



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

RENOVACE LOPATEK ROTORU ROZTRÍSKOVAČE

RENOVATION OF WOOD FLAKER ROTOR BLADES BY FLUX CORED WIRES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Soldán

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marián Sigmund, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jan Soldán**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Marián Sigmund, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Renovace lopatek rotoru roztřískovače

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Obecně renovace strojírenských součástí lze řešit mimo jiné i svařováním či navařováním a je mnohdy z pohledu ekonomiky levnější variantou než vyrábět nový díl. Konkrétně je potřeba navrhnout a zvládnout danou opravu či renovaci hlavně po stránce technologické – dodržovat požadované parametry s ohledem na výslednou kvalitu a konstrukci původního dílu, v tomto konkrétním případě při renovaci lopatek rotoru roztřískovače.

Cílem práce je porovnat vliv parametrů svařování na různé typy, z hlediska výrobních možností plnění tvrdokovových elektrod s kovovým práškem.

Cíle bakalářské práce:

1. Zhodnotit současný stav renovací svařováním.
2. Vypracovat literární rešerši možných technologií svařování pro renovace, včetně typů přídavných materiálů s ohledem na plnění tvrdonávarové elektrody.
3. Vyhodnotit parametry a podmínky navařování při konkrétní aplikaci renovaci lopatek rotoru roztřískovače.
4. Navrhnout podmínky pro certifikaci postupu navařování a parametry pro experimentální ověření.
5. Provést a vyhodnotit experiment.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan. Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.

PILOUS, Václav. Materiály a jejich chování při svařování, 1. vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009.

FOLDYNA, Václav. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.

AMBROŽ, Oldřich. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

MAJER, Lubomír. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-70-5.

BARTÁK, Jiří. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Soldán Jan: Renovace lopatek rotoru roztrískovače

Bakalářská práce se zabývá renovací lopatek rotoru roztrískovače metodou navařování. V literární rešerši byly popsány možnosti navařování včetně přídavných materiálů. Následně byl proveden experiment s cílem porovnat, zhodnotit a zjistit která z dvojice tvrdokovových plněných elektrod je pro danou renovaci vhodnější a vytvořit pro tuto plněnou elektrodu certifikaci postupu navařování. Dvojice plněných elektrod byla porovnána z hlediska vneseného tepla, ceny, mikro/makro struktury a výsledné tvrdosti návaru. Závěrem porovnání bylo rozhodnuto, že se na renovaci lopatek rotoru roztrískovače, díky velké tvrdosti výsledného návaru, hodí plněná elektroda s označením Megafil A760M. Závěrem práce byla pro vybranou plněnou elektrodu vypracována specifikace svařovacího postupu dle EN ISO 15 609-1.

Klíčová slova: Tvrdokov, svařování, navařování, plněná elektroda, FCAW

ABSTRACT

Soldán Jan: Renovation of wood flaker rotor blades by flux cored wires

The bachelor thesis presents a state of renovation of wood flaker rotor blades by flux cored arc welding. The theoretical part of the thesis presents possible ways of renovations with materials included. Subsequently, in order to find out, which one of two flux cored electrodes are more suitable for this specific renovation, the experiment was made. The flux cored electrodes were compared in heat input, price, micro and macro structure and final hardness of welded material. Due to very high hardness results, the flux cored electrode named Megafil A760M was chosen to be used in the renovation. At the end of the thesis, the specification of welding process was according to EN ISO 15 609-1 standard.

Keywords: Flux cored electrode, FCAW, welding, welding renovation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SOLDÁN, Jan. *Renovace lopatek rotoru roztrískovače*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116365>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Marián Sigmund.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 23. 5. 2019

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Mariánu Sigmundovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále chci poděkovat své rodině za trpělivost a podporu při celém studiu.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1. SOUČASNÝ STAV RENOVAČÍ SVAŘOVÁNÍM	10
1.1 Představení firmy PILANA a. s.	10
1.2 Rozbor součásti.....	11
2. TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ PRO RENOVAČE	13
2.1 Metoda FCAW	13
2.1.1 Zdroje pro svařování metodou FCAW	15
2.1.2 Plněné elektrody a jejich podavače	17
2.1.3 Svařovací hořáky.....	21
2.2 Další možné metody navařování	21
3. MATERIÁLY A JEJICH SVAŘITELNOST	24
3.1 Vliv jednotlivých prvků na svařitelnost	25
4. PARAMETRY, PODMÍNKY NAVAŘOVÁNÍ A EXPERIMENT	27
4.1 Porovnání a vyhodnocení parametrů navařování	27
4.2 Porovnání a vyhodnocení ceny za použité přídatné materiály	29
4.3 Porovnání a vyhodnocení makro a mikro struktury.....	30
4.4 Porovnání a vyhodnocení tvrdosti	36
5. CERTIFIKACE NAVAŘOVÁNÍ.....	40
6. ZÁVĚRY	43

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

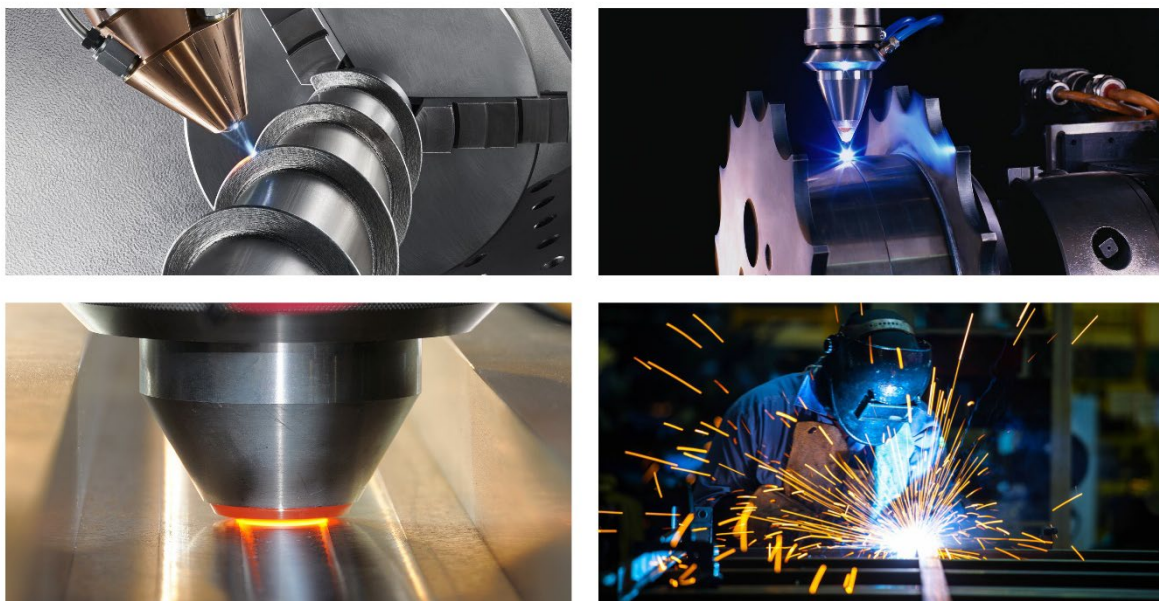
Seznam příloh

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6]

Svařování, jakožto technologie, které se využívá k vytvoření nerozebíratelného spojení více součástí, se vyskytuje v historii lidské populace přes tisíce let. Svařování kovů je možné datovat do ranné doby železné. V té době se používala jediná metoda, nazývaná kovářské svařování. Celá staletí bylo kovářské svařování jedinou známou metodou spojování materiálů nerozebíratelným spojem.

V průběhu 19. století byly v Evropě rozvinuty a zkoumány nové metody spojování materiálů. Jednalo se o metody svařování elektrickým obloukem, odporové a plamenové svařování. Počátkem 19. století byla objevena a následně prozkoumána možnost tavení kovu elektrickým obloukem. Jako počátek historie této metody je možno brát práci angličana sira Humpree Davyho, která byla vydána v roce 1801. O 80 let později v roce 1881 byla poprvé použita uhlíková elektroda k obloukovému svařování olověných desek. V Paříži v roce 1889 byl na světové výstavě prezentován první svarový spoj svařený uhlíkovou elektrodou pomocí elektrického oblouku ruským vynálezcem Bernardosem.

V dnešní době je využíváno mnoha technologií svařování, laserové svařování, plazmové svařování, svařování třením, svařováním za pomoci elektrického oblouku s možným využitím ochranného plynu, viz obr. 1., a mnoho dalších. Technologii svařování lze využít nejen pro spojování materiálů, ale i k navařování materiálů na základní materiál. Za pomoci této technologie jsme schopni výrazně zlepšit mechanické vlastnosti součástí na místě, či ploše, kde je předpokládáno namáhání, nebo opotřebení. Poslední desetiletí se výrazným způsobem rozvíjí 3D tisk kovů pomocí navařování, či spékání kovových prášků, viz obr. 1 navařování s využitím laseru.



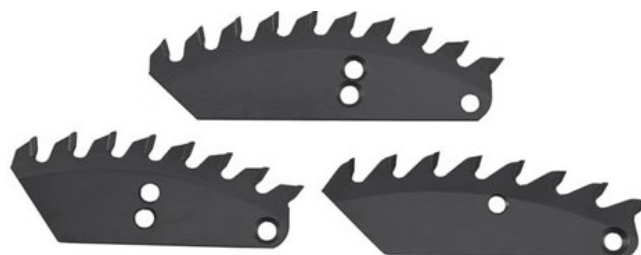
Obr. 1 Příklady využití svařování a navařování [2], [3], [4], [6]

1. SOUČASNÝ STAV RENOVACÍ SVAŘOVÁNÍM [7]

Renovace součástí nebo konstrukcí je komplexní soubor činností a postupů s cílem obnovení, či zlepšení mechanických vlastností, provozuschopnosti i bezvadného fungování za svého technického života. Jednu z takových renovací provádí i firma PILANA a.s., na opotřebovaných rotorech roztrískovačů.

1.1 Představení firmy PILANA a. s. [8], [9]

Společnost PILANA a.s. byla založena s původním názvem „První moravská továrna na pily a nástroje“ v roce 1934 panem Josefem Studeníkem. Prvními vyráběnými nástroji na zpracování dřeva byly kotoučové a ruční pily. Postupem času se sortiment vyráběných produktů rozšířil o frézy na dřevo, pilové kotouče s břity ze slinutých karbidů, rámové a kmenové pily, hoblovací a průmyslové nože, nástroje na dělení kovů a těla pil. Na obrázku 2 jsou roztrískovací segmenty od společnosti PILANA a.s. V roce 1992 začala firma používat název PILANA TOOLS, pod kterým aktuálně působí.



Obr. 2 Roztrískovací segmenty [9]

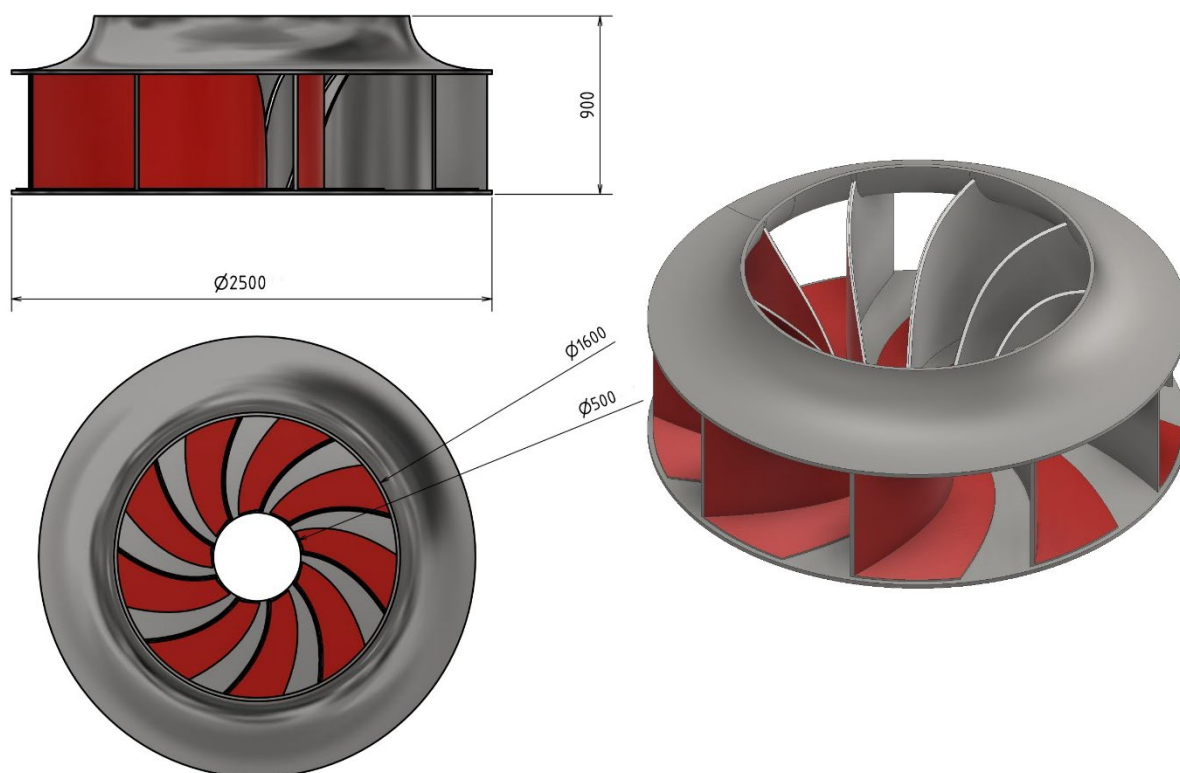
V současnosti dynamicky se rozvíjející firma PILANA TOOLS se sídlem v Hulíně, viz obr. 3, patří mezi největší výrobce nástrojů v Evropě a díky přibližně 600 zaměstnancům zároveň i k velmi významným zaměstnavatelům v České republice. Tato společnost díky své soustavné pozornosti na zefektivňování výrobních procesů spojené s dlouholetou tradicí nabízí vysoce kvalitní výrobky za výhodné ceny. Díky takto zvolené strategii firma PILANA TOOLS současně exportuje přibližně 80 % své celkové produkce do 92 zemí světa. Aktivní zapojení společnosti do zahraničních trhů a usilovná expanze zajistili od roku 2000 dvojnásobného zvýšení obrátu. Množství a hodnoty zakázek dokazují významné postavení firmy jak v České republice, tak na světovém trhu.



Obr. 3 Sídlo firmy PILANA a.s. [8]

1.2 Rozbor součástí [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18]

Renovovanou součástí jsou lopatky rotoru roztřískovače. Tento rotor je součástí industriálního stroje, který má velké využití v dřevozpracujícím průmyslu. Součást je svařena z několika zahnutých plechů neboli lopatek, horního a spodního plechu rotačního tvaru. Nejvíce namáhanou částí jsou lopatky, které plní úkol nože. Jelikož se rotor otáčí vždy stejným směrem, je potřeba brát v potaz velké opotřebení základního materiálu na vnitřní straně řezných lopatek. Z toho důvodu se lopatky na řezné straně navařují tvrdokovem. Na obr. 4 jsou zobrazeny základní rozměry a model rotoru roztřískovače s červeně vyznačenými plochami pro naznačení navařovaných ploch.



Obr. 4 Základní rozměry rotoru roztřískovače

Základním materiálem je ocel S355J2+N (dle ČSN EN 10027-1). Jedná se o svařitelnou normalizačně válcovanou nelegovanou konstrukční ocel s předepsanými hodnotami mechanických vlastností a daným obsahem uhlíku (C), fosforu (P), síry (S) a dalších prvků. Vybrané mechanické vlastnosti základního materiálu, zjištěné z inspekčního certifikátu firmy Vítkovice Steel a. s. pro tavbu 19215, viz přílohy, jsou uvedeny v tabulce číslo 1. a chemická analýza základního kovu, opět pro tavbu číslo 19215, jsou uvedeny v tabulce číslo 2.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti oceli S355J2+N pro tavbu číslo 19215 [12]

Vybrané mechanické vlastnosti oceli S355J2+N		
Horní mez kluzu R _{eH} [MPa]	Mez pevnosti v tahu R _m [MPa]	Tažnost A [%]
355	543	29,9

Tab. 2 Chemická analýza oceli S355J2+N pro tavbu číslo 19215 [12]

Chemická analýza oceli S355J2+N										
Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
[%]	0,187	1,5	0,39	0,014	0,003	0,014	0,052	0,036	0,005	0,008

Pro zajištění co nejlepších dlouhodobých výsledků při renovaci lopatek rotoru roztrískovače je potřeba vytvořit návar o vysoké tvrdosti. Na zkušební vzorek, ocelovou desku o tloušťce 20 mm, byly navařeny dva návary. Na takto zhotovené návary byly použity dva typy plněné elektrody s kovovým práškem od rozdílných dodavatelů.

V aktuálním případě bylo použito na renovaci zadané součásti technologie svařování za pomoci elektrického oblouku. Na místo tradičního MIG/MAG svařování, popřípadě navařování, bylo využito metody FCAW (Flux Cored Arc Welding). Dle normy ČSN EN ISO 4063 se metoda obloukového svařování plněnou kovovou elektrodou s kovovým práškem v aktivním plynu číselně označuje 138. Tato metoda využívá svařování, nebo navařování tavící se plněnou elektrodou s použitím ochranného plynu směsi 82 % argonu (Ar) a 18 % oxidu uhličitého (CO₂). Často se v praxi používá označení – svařování trubičkovými elektrodami. V případě této renovace byly použity dvě kovové plněné elektrody, obě o průměru 1,2 mm, jejichž názvy a výrobcem dané chemické složení s předpokládanou tvrdostí je popsáno v tab. 3.

Tab. 3 Použité kovové plněné elektrody [18], [19]

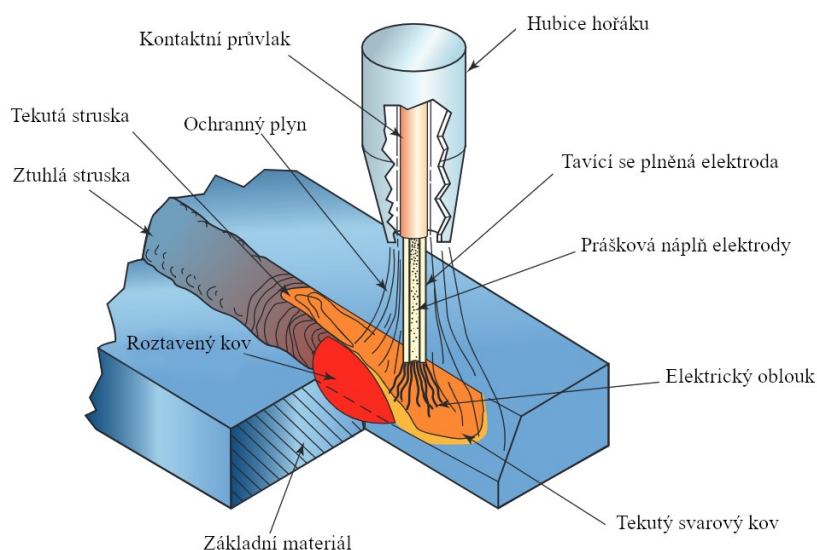
Chemické složení kovových plněných elektrod						
Název	Tvrdost	C	Si	Mn	Cr	Mo
OK Tubrodur 60 G M	550–650 HV	0,60	0,80	0,80	5,50	1,00
Megařil A760M	57–63 HRC	0,50	0,60	1,50	6,00	0,50

2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ PRO RENOVACE

Renovace svařováním mělo a vždy bude mít nezastupitelnou roli při různých opravách jak v průmyslu, tak i v každodenním životě. V případě renovací opotřebovaných součástí, nebo nutnosti zlepšení mechanických vlastností, lze využít navaření nového materiálu. Této myšlenky využila firma Pilana a. s. při renovaci lopatek rotoru roztrískovače. Jedna z prvních technologií, které firma používala pro renovace byla technologie ručního obloukového svařování obalovanou elektrodou. Navařování obalovanou elektrodou je metoda, která má mnoho výhod, například jednoduché ovládání bez potřeby složité svářecí soustavy, ale i nevýhod, například potřeba správně vysušených elektrod. Po určité době firma přešla na renovaci součástí za pomoci metody FCAW, která přinesla mnoho dalších možností.

2.1 Metoda FCAW [2], [20], [21], [22]

Metoda FCAW (Flux Cored Arc Welding) je poměrně nová metoda rozvíjená převážně v USA. FCAW využívá svařování, popřípadě navařování, tavící se kovovou elektrodou plněnou kovovým práškem v elektrickém oblouku. U této metody svařování v elektrickém oblouku lze použít ochranného plynu, ale není to podmínkou. Práškem naplněná kovová elektroda může obsahovat prvky tvořící v průběhu svařování vlastní ochrannou atmosféru.

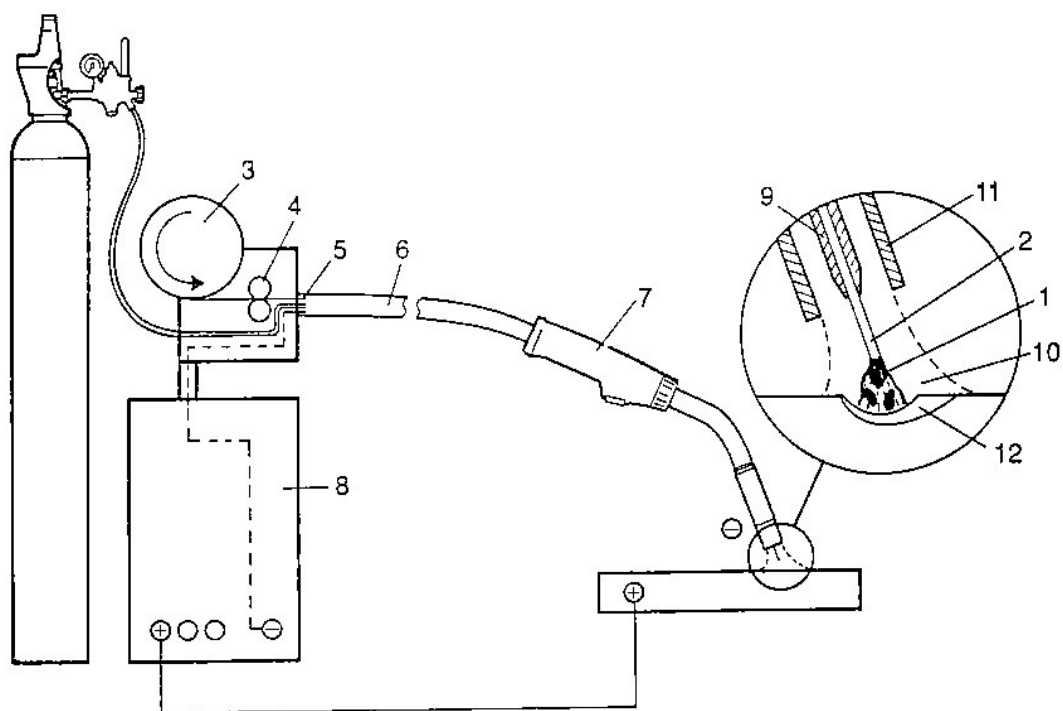


Obr. 5 Schematické zobrazení FCAW [20]

Na obr. 5 je schematicky zobrazen proces svařování FCAW s použitím ochranného plynu.

Svařování probíhá za využití elektrického oblouku, který dodává potřebnou tepelnou energii do procesu. Elektrický oblouk je nízkonapěťový elektrický výboj o dostatečné proudové hustotě, který prochází ionizovaným plynem a hoří mezi elektrodou (katoda) a základním materiálem (anoda). K stabilitě hoření je potřeba vyšší napětí, než je ionizační napětí daného prostředí a proudu potřebného k ionizaci plynu. Takto ionizovaný plyn se vyskytuje mezi katodou a anodou jako plazmový sloupec, který v závislosti na prostředí má teplotu 4000–8000 °C. Takto vzniklé teplo se využívá k natavení základního materiálu a zároveň tavení přídavného materiálu. Pro hladký průběh procesu je potřeba dodávat materiál (tavící se elektrodu) s konstantní rychlostí.

Svařovací zařízení pro metodu FCAW je kvůli vysoké podobnosti s technologií MIG/MAG totožné, viz obr. 6, a mohou být dvojího typu. Monofunkční, použitelné pouze pro technologie MIG/MAG a od nich odvozené (FCAW), a multifunkční zařízení použitelné pro metody svařování TIG a ruční obalenou elektrodou.



Obr. 6 Základní schéma svařování metodou FCAW [2]

- | | |
|---------------------------------|------------------------------|
| 1 – elektrický oblouk | 2 – kovová elektroda |
| 3 – zásobník elektrody | 4 – podávací kladky |
| 5 – rychloupínací spojka | 6 – hořákový kabel |
| 7 – svařovací hořák | 8 – zdroj svařovacího proudu |
| 9 – kontaktní svařovací průvlak | 10 – ochranný plyn |
| 11 – plynová tryska | 12 – svarová lázeň |

Mezi nutné vybavení pro svařování metodou FCAW se zahrnují tyto komponenty:

- Zdroj svařovacího proudu s řídicí jednotkou
- Podavač drátové elektrody
- Svařovací hořák
- Multifunkční kabel hořáku s rychlospojkou
- Uzemňovací kabel se svorkou
- Zásobník ochranného plynu s redukčním ventilem

S ohledem na výkon, složitost, náročnost a další požadavky výroby mohou být dnešní výkonné zařízení vybaveny prvky zlepšující jejich svařovací schopnosti. Jedním z nejčastějších prvků může být chladicí jednotka pro chlazení hořáku i svařovacího kabelu, různé mezipodavače tavících se elektrod, pojízdný vozík, nebo mechanické rameno pro nesení hořáku i kabelu.

2.1.1 Zdroje pro svařování metodou FCAW [15], [21], [22], [23], [24]

Stejně jako základní schéma pro svařování metodou FCAW, tak i svařovací zdroje jsou totožné pro metody MIG/MAG i FCAW. Za účelem svařování metodou FCAW se používají zdroje se stejnosměrným výstupem proudu. U této metody je záporný pól zdroje (katoda) přiveden na tavící se plněnou elektrodu.

Svařovací zdroje lze rozdělit dle množství točivých elementů na dvě základní skupiny, točivé a statické (netočivé). Metoda svařování plněnou elektrodou si žádá pro bezchybné fungování stabilní přívod stejnosměrného proudu, tedy statický svařovací zdroj. Jedním ze statických svařovacích zdrojů používaných v minulosti byl svařovací usměrňovač. Svařovací usměrňovače měli za síťový transformátor zařazený elektronicky řízený usměrňovací člen, pomocí kterého byl dodáván stejnosměrný proud. Tento proud bylo možné měnit na různé intenzity v rámci stanovené svařovací periody. Velkou nevýhodou usměrňovačů byly jejich rozměry a vysoká hmotnost, která se pohybovala okolo 200 kg, což způsobovalo značnou imobilitu.

Díky technologickému vývoji na poli elektrotechniky a novým materiálům se zlepšily i svařovací zdroje. Zdroje novějšího typu se nazývají střídače, nebo invertory. Nová generace zdrojů nevyužívá síťový transformátor, který tvořil většinu váhy u svařovacích usměrňovačů. Tyto zdroje využívají transformace elektrického proudu při vyšších frekvencích, než je síťová (50 Hz). Pracovní frekvenční rozsah obvyklého invertoru se pohybuje mezi 50 kHz až 200 kHz. S ohledem na výkon použitého zdroje většina invertorů pracuje na rozsahu elektrického napětí 10 až 40 V a rozsahu elektrického proudu 40 až 600 A. Zároveň díky novým technologiím a výzkumu svařovacích zdrojů, mají dnešní svařovací invertory i podstatně menší rozměry i hmotnost než svařovací usměrňovače. Hmotnost dnešních invertorů se pohybuje přibližně od 4 kg do 35 kg a nejmenší svařovací invertory jsou v půdoryse přibližně stejně velké jako papír velikosti A4. Digitalizace průmyslu se nevyhnula ani svařovacím zdrojům. Novější svařovací zdroje lze programovat a ukládat svařovací cykly do vnitřní paměti. Tato vlastnost velice ulehčuje a zrychluje celkový svařovací proces. Na obr. 7 je ukázka moderního svařovacího invertoru od firmy Powermat.



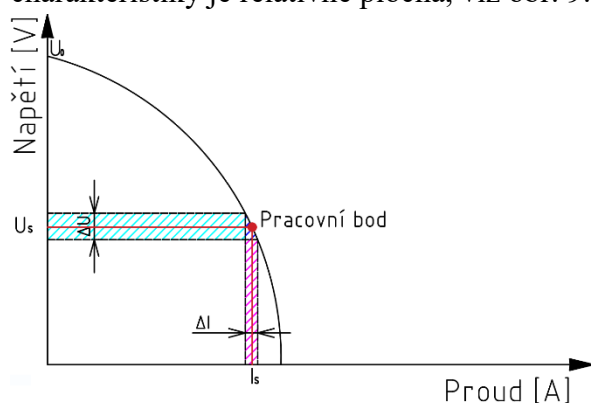
Obr. 7 Svařovací invertor od firmy Powermat [22]

Každý zdroj elektrické energie pracuje na určitých výstupních hodnotách, které se popisují voltampérovou charakteristikou. Jinak tomu není ani u svářecích zdrojů pro metodu svařování elektrickým obloukem. Pro metodu svařování tavící se elektrodou spadají výstupní charakteristiky do dvou kategorií. Zdroje elektrické energie s konstantním napětím (plochá charakteristika) a zdroje elektrické energie s konstantním proudem (strmá charakteristika). Každá ze zmíněných charakteristik má své typické chování při svařování.

Svařovací zdroje se strmou voltampérovou charakteristikou byly velmi užívané na počátcích rozvoje technologie svařování v elektrickém oblouku s tavící se elektrodou. V dnešní době se tyto zdroje používají pouze při svařování hliníku. Takto vyrobené zdroje fungují podle klesající výstupní křivky, viz obr. 8. Při konstantním proudu, vzdálenost mezi tavící se elektrodou (katodou) a základním materiálem (anodou) určuje délku elektrického oblouku. Pokud tato vzdálenost klesá, klesá také délka elektrického oblouku a naopak. Tyto vlastnosti strmé charakteristiky představovaly velký problém z hlediska zavedení poloautomatického svařování, jelikož je velice obtížné udržet stejnou vzdálenost mezi katodou a anodou po celou

dobu svařování. Z toho důvodu musely být do svařovací sestavy přidány speciální podavače drátu, které jsou schopny reagovat na změny v elektrickém obvodu a zrychlit, či zpomalit rychlost podávání díky čemuž je po celou dobu svařování délka oblouku konstantní.

Problémy s potřebou podávání tavicího se materiálu různou rychlostí odpadají při použití svařovacího zdroje s plochou voltampérovou charakteristikou. Takto navržené zdroje poskytují konstantní napětí pro danou rychlost dodávání tavicí se elektrody. Křivka voltampérové charakteristiky je relativně plochá, viz obr. 9.

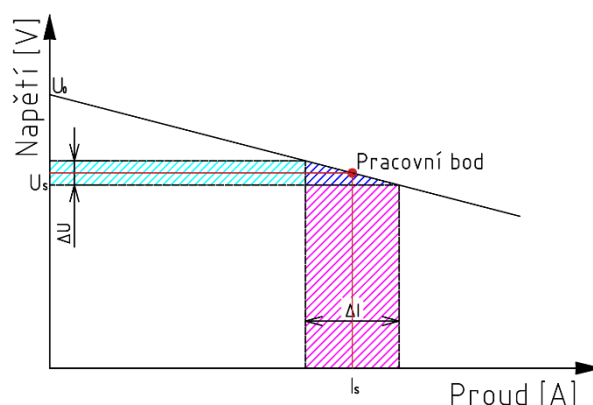


Obr. 8 Strmá voltampérová charakteristika

[15]

U_0 – Napětí naprázdno
 I_s – Proud při svařování
 ΔU – Rozdíl napětí

U_s – Napětí při svařování
 ΔI – Rozdíl proudu



Obr. 9 Plochá voltampérová charakteristika

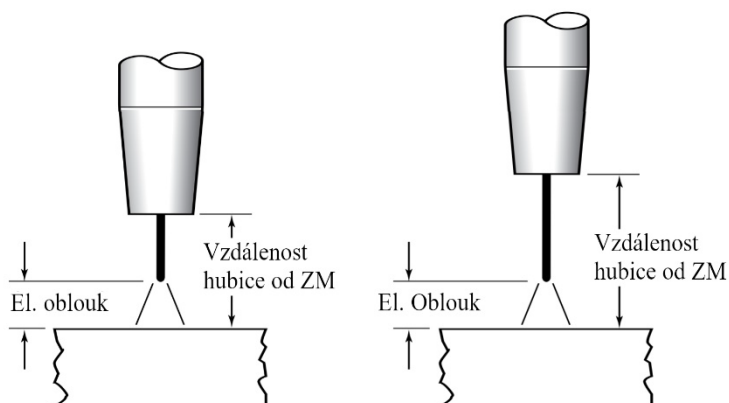
[15]

U_0 – Napětí naprázdno
 I_s – Proud při svařování
 ΔU – Rozdíl napětí

U_s – Napětí při svařování
 ΔI – Rozdíl proudu

Jakmile se zvýší vzdálenost katody od anody, drasticky se sníží svařovací proud a proudové zatížení tavicí se elektrody klesá, elektroda se ohřívá a taví pomaleji. Délka elektrického oblouku díky těmto vlastnostem zůstává stejná, viz obr. 10, pouze se mění vzdálenost hubice hořáku od základního materiálu (ZM). Zdroje pro svařování FCAW splňují plochou voltampérovou charakteristiku.

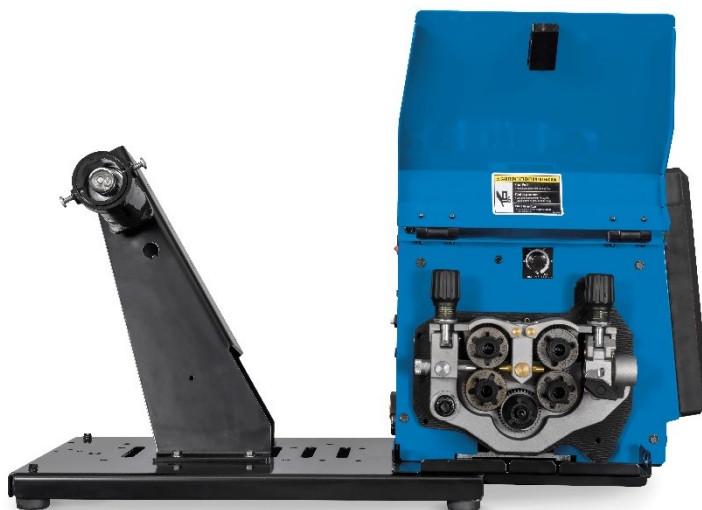
Tato vlastnost je u svařování metodou FCAW obzvlášť potřebná, protože plněné elektrody díky své konstrukci mají až o 50 % větší proudové zatížení. Jinak řečeno, při daném svařovacím proudu se plněné elektrody taví podstatně rychleji. Kdyby nebyla zajištěna konstantní vzdálenost, mohla by nastat situace, že z důvodu velké vzdálenosti katody od anody by se přerušil elektrický oblouk a kontinuální svařování by bylo přerušeno.



Obr. 10 Konstantní velikost elektrického oblouku [24]

2.1.2 Plněné elektrody a jejich podavače [1], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31]

Při svařování metodou FCAW je potřeba kontinuálně dodávat tavicí se plněnou elektrodu. K tomu slouží podavač drátu, který je schopen nepřetržitě dodávat tavicí se elektrodu potřebnou rychlostí do procesu bez její deformace, či poškození, což je velice důležité pro možnost správného ovládání procesu svařování a výslednou kvalitu svaru. Většina podavačů je opatřena kvalitně převodovaným elektromotorem, který poskytuje rychlé starty i zastavení podávacího mechanismu. Rychlost podávání drátu je velice důležitým parametrem každého podavače. Mnoho podavačů je schopno podávat drát rychlostí 2–20 metrů za sekundu. Speciální podavače jsou schopny dosáhnout podávací rychlosti až 30 metrů za sekundu. Funkce podavačů je zajištěna podávacím mechanismem, který je poháněn elektromotorem. Tyto mechanismy mohou být jednokladkové, dvoukladkové, čtyřkladkové a mechanismus s mimoběžnými osami. Na obr. 11 je ukázka čtyřkladkového podávacího mechanismu od firmy Miller Electric.

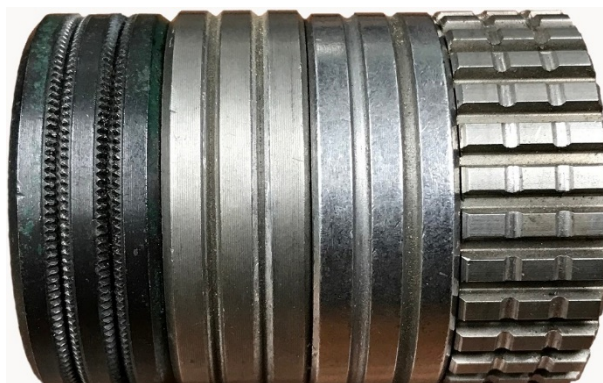


Obr. 11 Čtyřkladkový mechanismus [25]

Kladek používaných v podávacích mechanismech je více druhů. Svařovací plněné elektrody dodávané ve svitcích jsou více náchylné na deformační poškození, například ohnutí, než je to u plných svařovacích elektrod. Díky těmto vlastnostem by se měly používat podávací kladky rozměrově závislé na průměru podávané elektrody. Pro podávání plněných elektrod je možné rozlišovat dva typy drážek na kladkových podavačích:

- **Drážky tvaru písmene U** se u FCAW používají pouze pro plněné elektrody s malým průměrem, protože menší průměry trubiček jsou odolnější proti ohnutí nebo promáčknutí. Dále se mohou používat pro podávání hliníkových svařovacích elektrod. Pro podávání větších rozměrů plněných elektrod se používá ozubení na vnější straně kladkového podavače. Takto zhotovené podavače se doporučují k podávání drátu větších rozměrů.
- **Drážky tvaru písmene V** mohou být dvojího druhu, rýhovaná nebo s hladkou plochou. Rýhovaná drážka se díky svému tvaru jemně zařezává do dodávaného materiálu což zajišťuje bezproblémový přísun materiálu a je doporučováno ji používat pro plněné elektrody o rozměrech 1,6 mm a větších. Díky své vhodnosti pro plněné elektrody je rýhovaná drážka hojně používaná. Hladká V drážka se obvykle používá pro plné drátové elektrody.

Na obrázku 12 je možné vidět 4 typy podávacích kladek, kde z levé strany jsou dvě V drážky, s rýhováním a bez. Z pravé strany jsou dvě podávací kladky s U drážkami, hladká a s vnějším ozubením.



Obr. 12 Typy podávacích kladek [27]

Podávací systémy podavačů drátu je možno rozdělit na tři kategorie:

- V případě systému **tažení** drátové elektrody se nachází malý elektromotor umístěný na svařovacím hořáku dodávající svařovací elektrodu pomocí podávacích kladek do procesu. Za pomoci tohoto systému je vhodné dodávat drátové elektrody malých průměrů bez potíží, které by vznikly dlouhou přesunovou dráhou. Nevýhodou tohoto systému podávání je výrazně větší hmotnost svařovacího hořáku a omezené využití podávacího materiálu, které musí být malých průměrů. Kvůli rozměrům plněných elektrod je tento systém podávání pro metodu FCAW nevhodný. Na obr. 13 je ukázka svařovacího hořáku s systémem tažení drátu od společnosti Miller Electric.



Obr. 13 Svařovací hořák Miller [28]

- Systém **tlačení** drátu s podavačem, umístěným bezprostředně za zdrojem drátového materiálu, je nejpoužívanější způsob podávání materiálu do svařovacího procesu pro poloautomatické svařování. V tomto případě podávání je elektroda brána z cívky, nebo svitku a dále tlačena skrze pružnou trubkovitou podporu (obvykle zpevněná hadice) skrz svařovací hořák do svařovacího procesu. Zpevněná hadice může mít délku až 3,7 m což dává svářečímu personálu dostatečnou volnost při svařování. Další velkou výhodou je absence podavače na svařovacím hořáku, což výrazně snižuje jeho hmotnost a zvyšuje schopnost manipulace. Pro svařovací plněné elektrody používané v procesu FCAW, které jsou relativně velkých rozměrů, je tato metoda vhodná.



Obr. 14 Invertor se systémem tlačení elektrody [29]

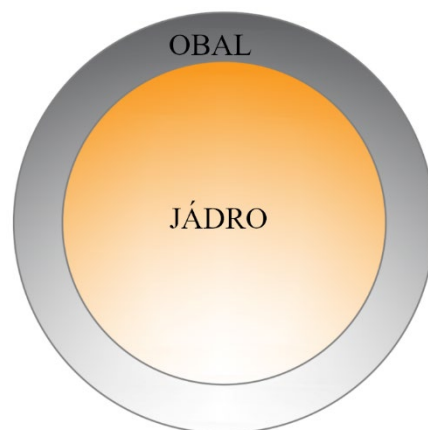
- Kombinace **tlačení** a **tažení**, neboli „**Push-pull**“ systém spojuje výhody dodávání svařovací elektrody systému tažení i tlačení. Tento systém disponuje dvěma motory. První motor je umístěn stejně jako u systému tažení hned za zdrojem drátové elektrody. Druhý motor se nachází stejně jako u systému tlačení na svařovacím hořáku. Oba tyto motory pohání podávací kladky synchronizovaně. Podáváný elektrodový drát je tedy ve stejnou dobu tlačен i tažen. Tento typ poskytuje velice stabilní a šetrné podávání elektrody do svařovacího procesu, což snižuje možnost výskytu defektů. Ovšem při použití hořáku s podavačem se zvyšuje jeho hmotnost, díky čemuž se zhoršuje ovladatelnost. Pro Push-pull systém se používají stejné podavače drátu jako u systému tlačení, ale jiné svařovací hořáky. Ukázka svařovacího hořáku používaného pro Push-pull systém je vidět na obrázku 15.



Obr. 15 Hořák pro Push-pull systém [30]

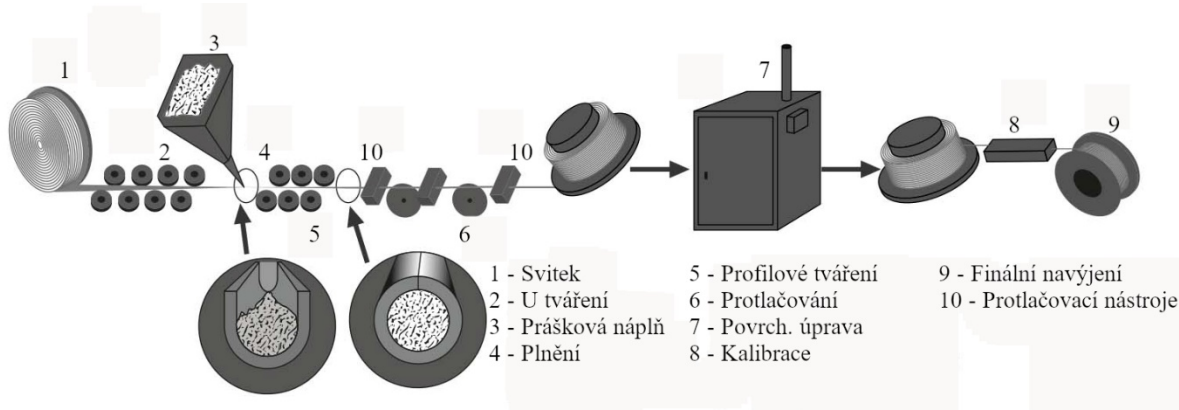
Pro systém FCAW je doporučováno používat systém podávání za pomoci tlačení. Díky větším rozměrům plněných elektrod obvykle není problém s jejich vedením do svařovacího hořáku.

Tavící se svařovací elektrody pro metodu FCAW se skládají ze dvou částí, viz obr. 16. První část je kovový vodivý obal, který zapříčiňuje hoření el. oblouku. Druhá část je jádro elektrody, které je tvořené kovovým práškem s možnou příměsí. Příměs může obsahovat plynotvorné prvky používané při svařování bez ochranného plynu, legující prvky za pomoci kterých je možné ovlivnit mechanické vlastnosti vzniklého svarového kovu a mnoho dalších. Elektrody navrženy pro vlastní plynovou ochranu obsahují více čistících, nebo odplyňovacích prvků než elektrody určené pro svařování za přívodu ochranného plynu. Obal plněné kovové elektrody většinou tvoří od 75 do 90 % váhy elektrody.



Obr. 16 Plněná elektroda

Výroba plněných kovových elektrod je velice náročná především po technické stránce. Vyžaduje speciálně navrženou linku, která bude schopna za pomoci tváření plechu vyrábět tyto plněné elektrody. Na obrázku 17. lze vidět zjednodušené schéma výrobní linky pro plnění



kovové elektrody.

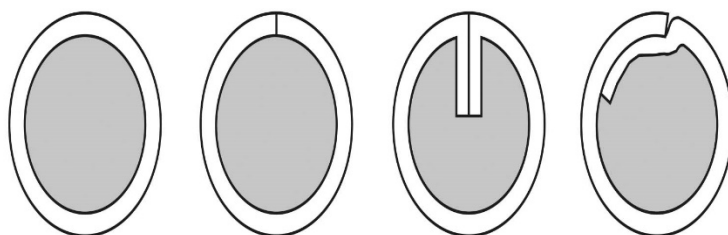
Obr. 17 Schematické zobrazení výroby plněných elektrod [31]

Na začátku výroby je tenký plech, který je vtahován mezi válce a následně tvářen do profilu písmene U. V tuto chvíli je do kontinuálně posouvajícího se plechu sypáno přesné množství kovové náplně. V další fázi plech putuje do uzavíracích válců, které vytvoří požadovaný kruhový profil. Takto připravený kruhový profil je protlačován přes protlačovací nástroje až do kalibrační zóny, kde je kalibrován na požadované rozměry. Po kalibraci téměř hotově vypadající plněná elektroda prochází povrchovými úpravami. Kvůli možné změně rozměrů po poslední operaci prochází plněná elektroda opět kalibrací. Na konci výroby je hotová a zkalibrovaná elektroda navinuta na cívku a připravena k použití.

Jedním z největších rozdílů plněných elektrod, kromě chemického složení, je způsob výroby. Plněné elektrody by se daly dle způsobu výroby rozdělit na bezešvé a švové elektrody. Na obrázku 18. je možné vidět vybrané typy plněných elektrod. Zobrazené profily elektrod na obrázku jsou bezešvé, jednoduché

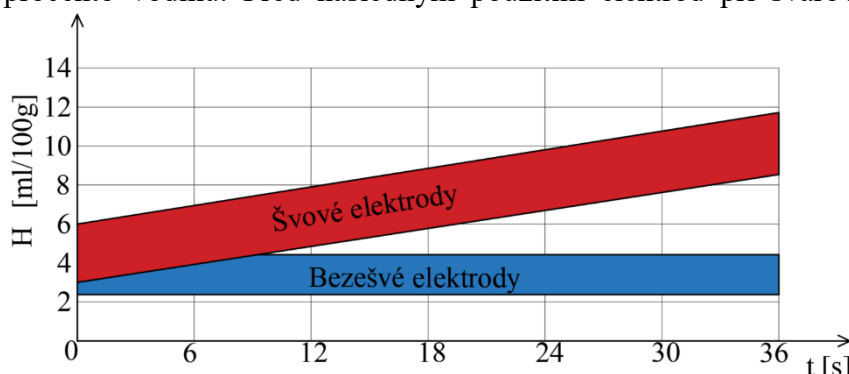
a složité švové elektrody. Za složité švové elektrody se dají považovat poslední dvě. Každý z těchto typů elektrod se vyrábí jinou technologií a mají svá pozitiva i negativa. Z uvedených čtyř typů elektrod mají největší výhody právě bezešvé elektrody.

Jedna z hlavních výhod bezešvých



Obr. 18 Profily různě vyrobených elektrod [31]

plněných elektrod je nepropustnost stěny trubičky. Na rozdíl od skládaných elektrod, které obsahují velmi malou mezeru mezi složenými částmi kovového pláště, bezešvé elektrody nemají mezeru žádnou. Tato vlastnost, dána technologií výroby, je velmi důležitá při ochraně kovové náplně elektrod proti atmosférické vlhkosti. Díky této ochraně je mnohem menší pravděpodobnost výskytu defektů ve svarovém kovu jako jsou porozita a studené trhliny. Tudiž, bez ohledu na dobu či podmínky skladování se do kovové náplně difunduje pouze malé procento vodíku. Před následným použitím elektrod při svařování není potřeba elektrody



Obr. 19 Podíl difundovaného vodíku na čase pro švové a bezešvé plněné elektrody [31]

vysoušet, či jinak připravovat. Na obrázku 19 je graficky znázorněno množství difundovaného vodíku do kovové náplně uvnitř elektrody v závislosti na čase vystavení elektrody vlhkému prostředí. Po celou dobu vystavení bylo v měřené místnosti 27 °C a 80% vlhkost.

Potřeba zdokonalovat odolnost plněných elektrod proti difúzi vodíku do náplně vedla po dlouholetém výzkumu v roce 2011 k patentu na výrobní proces NTL (New Laser Technology). Tento vysoce kvalitní proces výroby plněných elektrod využívá technologie tváření a laserového svařování. Takto svařené plněné elektrody jsou vysoce odolné proti difúzi vodíku, hodnota vodíku klesá až pod 3 ml/100 g.

2.1.3 Svařovací hořáky [23], [32], [33]

Svařovací hořáky pro metodu FCAW jsou dvojího typu. Hořáky s vodním chlazením, nebo hořáky chlazené vzduchem. Použití svařovacího hořáku s nebo bez vodního chlazení závisí na charakteru svařování. Pro svařovací procesy s malým příkonem se používají hořáky úplně bez chlazení, nebo se chladí za pomoci procházejícího ochranného plynu. Při svařování s vyšším výkonem je doporučeno použít hořáky s vodním chlazením, kvůli zachování životnosti komponentu. Jako chladicí kapalina se obvykle používá destilovaná voda. Z toho důvodu jsou pro svařovací obsluhu na hořácích pro metodu FCAW ochranné štíty. Na obrázku 20 je možné vidět ukázkou svařovacího hořáku pro svařování metodou FCAW bez použití ochranného plynu od firmy Lincoln Electric. Vodou chlazené hořáky vyžadují uzavřený chladicí okruh s dostatkem chladicí kapaliny.



Obr. 20 Svařovací hořák pro metodu FCAW [32]



Obr. 21 Porovnání svařování bez a s odvodem dýmu [23] přináší i menší nevýhodu v podobě svařovacího hořáku vyšší hmotnosti. Pokud jsou svařovací prostory vybaveny systémy pro lokální odvod kouře, tak speciální trysky není potřeba.

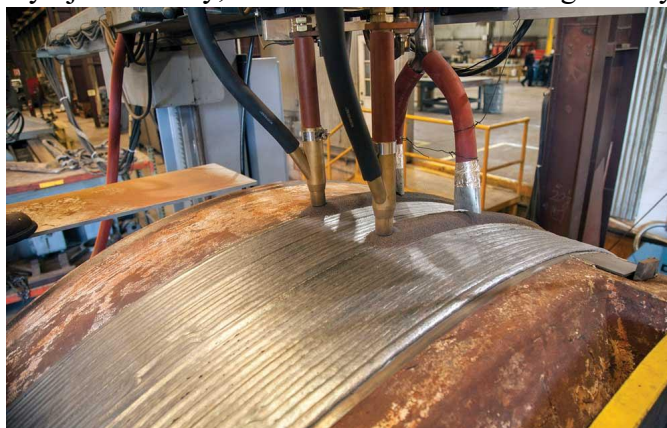
Z důvodu velkého množství kouře, který se vyskytuje v průběhu svařování plněnou elektrodou byly přiděleny na některé hořáky odsávače dýmu, viz obr. 21. Tyto odsávají vzniklý kouř při svařování skrz speciálně navrženou trysku, která se nachází na svařovacím hořáku. Odsávání přebytečného dýmu přináší mnoho výhod, jako čistější vzduch pro svařovací obsluhu. Zároveň to ale

2.2 Další možné metody navařování [21], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [15], [40], [41], [42]

V současné době existuje mnoho metod navařování. Pro navařování se používá mnoho technologií. Je možno navařovat za pomoci plamene, elektrického oblouku, plazmou, fokusovaným laserem anebo za pomoci elektrického odporu. Firma Pilana a. s. zvolila po zvážení předností i negativ metodou navařování FCAW s ochranným plynem. Existuje ale mnoho dalších metod navařování:

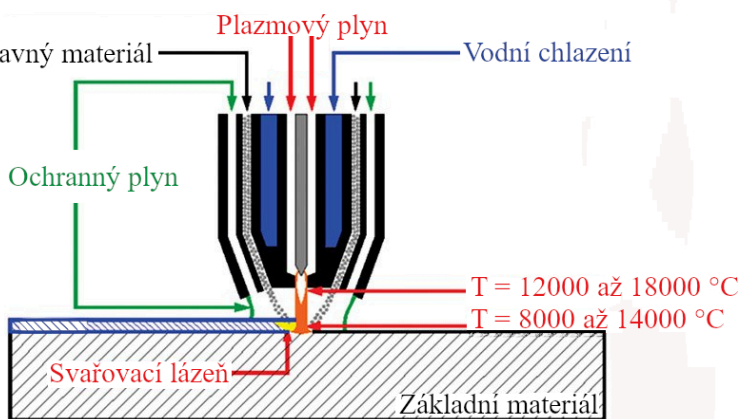
- **Metoda svařování pod tavidlem**, označována zkratkou SAW, je proces tavného svařování za použití elektrického oblouku. Elektrický oblouk hoří mezi tavící se elektrodou a základním materiálem pod vrstvou speciálního tavidla, které je do procesu přidáváno. Elektroda je tavena v uzavřeném prostoru pod tavidlem vyplněném parami a plyny vznikající za procesu a tím je lázeň chráněna od přístupu vzduchu a chráněna proti oxidaci okolní atmosférou. Část tavidla se v okolí elektrického oblouku taví a reaguje s tavnou lázní. Z toho důvodu je možné použít tavidla s dezoxidačními, či legujícími prvky, které zlepšují výsledné mechanické vlastnosti svaru. Nevyužité tavidlo, se následně odsává zpět do zásobníku a je opět použito. V současnosti je tato metoda svařování plně automatizována. Metoda svařování pod tavidlem je velice

výkonná metoda, která je určena převážně pro svařování větších tloušťek (nad 3 mm), tupých, nebo koutových svarů ve vodorovné poloze. Ve srovnání s ručním obloukovým svařováním může dosahovat až desetinásobné produktivity práce a větší postupové rychlosti svařování. Při zvětšování tloušťky materiálu roste produktivita oproti ručnímu svařování mnohem rychleji. Svařování pod tavidlem dosahuje velmi hlubokých závarů, a proto je možné svařovat větší tloušťky materiálu jedním svarem. Z důvodu zakrytí svarové lázně tavidlem se nevyskytují rozstříky, šetří se elektrická energie díky efektivnějšímu využití tepla a elektrický oblouk neoslňuje svářeče a okolí, což je zároveň nevýhodou, jelikož není možné sledovat chování svarové lázně. Tavící se elektrody mohou být uspořádány za sebou, tandemově, a tím se zvyšuje produktivita i výška návaru na jeden průjezd. Na obrázku 22 je zobrazeno využití metody SAW pro návary na válcovité součásti.



Obr. 22 Navařování materiálu metodou SAW [34]

- Plazmové navařování**, metoda využívající technologie svařování plazmovým obloukem s přídavným práškovým materiálem, viz obr. 23. Svařování za pomoci koncentrovaného plazmového paprsku je používáno už relativně dlouhou dobu. Plazmovým paprskem se rozumí vysoce ionizovaný plyn ohřátý na vysokou teplotu. Pro stabilizaci elektrického oblouku a následný vznik koncentrovaného paprsku je potřeba ionizovat minimálně 30 % plazmového plynu. Nejčastější plazmové plyny jsou: Ar, Ar + H₂, He + Ar, N₂. Koncentrovaný plazmový tok dosahuje velmi vysokých teplot, až 16 000 K a hustota výkonu se pohybuje kolem 10⁶ W.cm³. Velká tepelná hustota



Obr. 23 Schéma plazmového navařování [36]

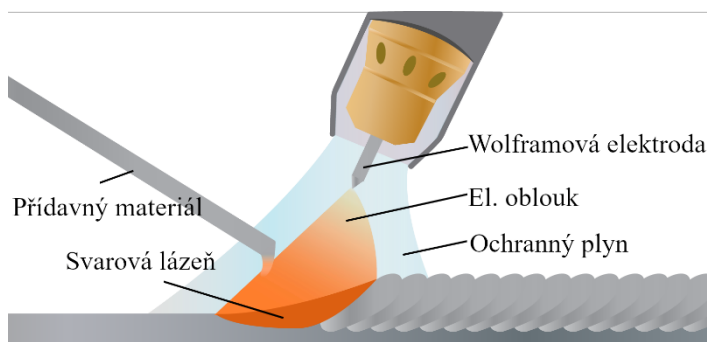
zajišťuje velmi rychlé natavení povrchu při malém tepelném ovlivnění základního materiálu. S touto charakteristikou souvisí malá tepelně ovlivněná oblast, nízká úroveň deformací, minimální natavení základního materiálu a velmi malá míra promísení základního materiálu s návarem. Proces lze realizovat v impulzním režimu průběhu svařovacího proudu od 0 do 1000 Hz, což minimalizuje tepelné ovlivnění základního materiálu. V dnešní době je velmi velká nabídka navařovacích prášků pro plazmové navařování. Přídavné materiály vytváří slitiny převážně na bázi niklu, kobaltu a vysokolegovaných ocelí s možnou tvrdostí až 70 HRC a vysokou tepelnou odolností. Mezi výhody navařování plazmou patří: malá tepelně ovlivněná oblast, návary bez pórů, bublin a ředin s metalurgickým spojením se základním materiálem.

- Laserové navařování**, neboli navařování vysoce energetickým fokusovaným svazkem fotonů je poměrně mladá a vysoce precizní technologie. Princip navařování spočívá v přívodu přídavného materiálu do oblasti, kde je laserový paprsek fokusován. Přídavný materiál je možné do místa svařování dopravit čtyřmi způsoby. Do svarové lázně kontinuálně přivádět přídavný materiál ve formě drátu nebo proudem prášku, jednou nebo radiálně symetrickými bočními tryskami, nebo za pomoci speciální svařovací hlavy s kuželovou tryskou s koaxiálním proudem prášku, viz obr. 24. Potřebná energie je dodávána přímo na místo navařování, bez většího tepelného vlivu na okolí návaru. Při navařování metodou využívající elektrického oblouku dosahuje teplota v místě navařování až 500 °C, a i když se od bodu návaru do okolí citelně snižuje, tepelné vlivy se projevují až 15 mm od tohoto bodu. V případě laserového navařování je teplota v bodě návaru cca 36 °C a nezasahuje dále než 1,5 mm od návaru. Tato vlastnost přináší velkou výhodu oproti ostatním běžně používaným metodám navařování, protože umožňuje navařování vnitřních hran na těžko přístupných a hluboko ležících místech. Návary jsou vysoce precizní a mohou být vytvářené s přesností na desetiny milimetru. Lze vytvářet gradované struktury s různými vlastnostmi a umožňuje nízké rozpuštění navařovaného materiálu v základním materiálu. Výsledná vrstva návaru je bez defektů. Jako negativa lze považovat strojní a instrumentální náročnost, nutné strojní vedení a velké počáteční investice.



Obr. 24 Kuželová tryška s koaxiálním přívodem [39]

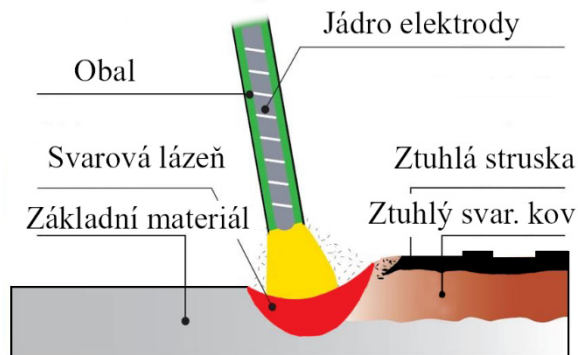
- Obloukové navařování metodou TIG**. Jedná se o metodu navařování za pomoci elektrického oblouku netavící se wolframovou elektrodou v inertním ochranném plynu s přídavným materiálem. Nejčastěji se jako ochranný plyn používá argon, helium nebo jejich směsi. Plyn proudí mírným přetlakem podél elektrody a je usměrňován keramickou trubicí. Přídavný materiál ve formě drátu je do svařovacího procesu přidáván buď ručně, nebo automatizovaným podavačem, viz obr. 25. Vzhledem k nízké proudové hustotě nevznikají velké průvary, ale dosahuje se vysoké kvality spoje. Svařovací proud pro metodu TIG se pohybuje v rozmezí 10–600 A zatímco napětí se na zdroji obvykle nastavuje v rozmezí 10 – 30 V. Inertní plyn zabraňuje přístupu vzduchu a velmi dobře ochraňuje svařovací proces a zároveň zabraňuje vzniku strusky, což zanechává čistý svar bez potřeby dalšího opracování. Metoda TIG je technicky velice náročná na svařovací zařízení, vyžaduje



Obr.25 Schéma svařování metodou TIG [41]

perfektní stav svařovací netavící se elektrody a má malou produktivitu. Z toho důvodu se používá spíše na návary menších rozměrů.

- **Ruční obloukové navařování obalenou elektrodou** je jedna z nejstarších svařovacích metod. Základem je elektricky vodivá elektroda, která je připojena za pomoci držáku k jednomu pólu zdroje, zatímco druhý pól zdroje je zemnicí svorkou připojen k svařované součásti, viz obr. 26. Podle tloušťky svařovaného materiálu, tvaru a plochy svaru se volí průměr elektrod. Nejčastější rozměry elektrod se pohybují od 1,6 mm do 6,3 mm. Svařovací parametry jsou obvykle uvedeny na obalu elektrody od výrobce. Podmínkou vytvoření vyhovujícího svaru je volba vhodné velikosti svařovacího proudu. I délka elektrického oblouku je důležitá, ovlivňuje totiž propal prvků, rozstřík tekutého kovu a naplynění svarové lázně. Metoda je vhodná ve všech svařovacích polohách. Rozsah svařovacího proudu se pohybuje od 50 do 450 A a svařovacího napětí od 15 do 40 V. V případě ručního svařování obalovanou elektrodou není zaručena přesnost návaru ani ochrana před pórovitostí a dalšími defekty. Obaly elektrod sice mohou obsahovat legující prvky pro zlepšení mechanických vlastností svaru a plynotvorné prvky, ale to nenahradí externí přívod ochranného plynu. Tato metoda je nejjednodušší z hlediska potřebného vybavení. Problémem této metody je, že elektrody by se měly vysoušet. Jinak hrozí možnost zvýšeného obsahu difúzního vodíku v návaru, což může způsobovat defekty.



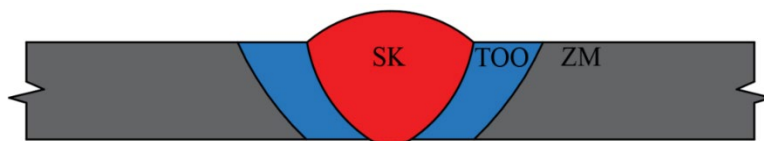
Obr. 26 Schéma obalované elektrody [42]

Při volbě vhodné metody navařování je potřeba posoudit mnoho faktorů. Mezi tyto faktory patří: velikost a tvar součásti, dosahovaná a požadovaná tloušťka návaru, druh a stav základního materiálu, možnost tepelného zpracování před vlastním navařováním a po navaření, rozsah možných opatření během navařování (možnost přehřevu), zda navařovaná součást už v minulosti prošla procesem navařování, vliv zředění svarového kovu a požadavek na vytváření vícevrstvých návarů. Dle teoretických znalostí a vlatního zhodnocení rozhodujících faktorů se zdají být, na renovaci rotoru roztrískovače, nejvhodnější dvě metody navařování: metoda FCAW a metoda plazmového navařování. U obou metod je možné navařovat manuálním hořákem, takže není potřeba žádného automatizovaného zařízení. Metody nabízejí, při použití správných přídatných materiálů, vysokou odolnost návarů proti opotřebení a velmi vysokou výslednou tvrdost. Zatímco u metody FCAW stačí jednoduchá strojní výbava, která je stejná pro všechny metody GMAW, tak u plazmového navařování by byla potřeba velkých investic do specializovaných strojních zařízení, která by byla vhodná pouze pro vnitřní použití.

3. MATERIÁLY A JEJICH SVAŘITELNOST [43], [16]

Svařitelnost ocelí udává, zda a za jakých podmínek lze vyhotovit svar splňující předepsanou jakost. Mechanické chování a vlastnosti uhlíkových ocelí jsou definovány obsahem uhlíku. V těchto ocelích by prvky jako síra a fosfor měly být přítomny v co nejmenší možné míře. Hlavními charakteristikami uhlíkových ocelí jsou nízká odolnost v korozním a oxidačním prostředí a výrazným snížením pevnosti při vyšších teplotách. Při svařování nelegovaných ocelí se tedy musí počítat s fázovou přeměnou v teplotně ovlivněné oblasti (TOO), která způsobuje zvýšení tvrdosti a současně snižování plastických vlastností základního materiálu. Na obrázku 27 je schematicky zobrazen řez svarovým kovem, kde SK je svarový kov, TOO tepelně ovlivněná oblast a ZM je základní materiál. S fázovou přeměnou vzniká i vnitřní tahové napětí, které může vést až ke vzniku trhlin. Pro oceli s hmotnostním podílem uhlíku $C < 0,25 \text{ hm. \%}$

není potřeba zavádět zvláštní svařovací podmínky. U ocelí s větším hmotnostním podílem uhlíku $C > 0,25$ hm. % je doporučeno zavádět zvláštní opatření k zamezení vzniku trhlin.



Obr. 27 Schéma řezu svařeného materiálu

K základnímu opatření vzniku trhlin patří předehřev. Za pomoci tohoto procesu, který se provádí před zahájením svařování, se sníží rychlost ochlazování svařovaného materiálu a tím se sníží nebezpečí vzniku zakalení, které by následně vyústilo v trhlinu. Velikost teploty předehřevu lze stanovit dle vztahu 3.1, výpočtu předehřevu dle Séferiána. Při použití Séferiánova vztahu jsou potřeba tři podpůrné výpočty 3.2, 3.3 a 3.4.

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.1)$$

Kde: C_p – konstanta zahrnující tloušťku materiálu a jeho chemické složení [-]

$$C_p = C_c + C_s \quad [-] \quad (3.2)$$

Kde: C_c – konstanta chemického složení [-]

C_s – konstanta zahrnující tloušťku materiálu [-]

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \quad [-] \quad (3.3)$$

Kde: C, Mn, Cr, Ni a Mo – procentuální zastoupení prvku v základním materiálu [%]

$$C_s = 0,005 \cdot s \cdot C_c \quad [-] \quad (3.4)$$

Kde: C_c – konstanta chemického složení [-]

s – tloušťka materiálu [mm]

Takto formulovaný vztah pro výpočet předehřevu je vhodný pro uhlíkové a nízkolegované oceli s obsahem uhlíku $C > 0,10$ hm. %. Pro orientační hodnotu předehřevu lze použít i tab. 4. Tab. 4 Orientační hodnoty předehřevu dle obsahu uhlíku [43]

Obsah uhlíku v hm. %	Teplota předehřevu ve $^{\circ}\text{C}$
0,20 až 0,30	100 až 150
0,30 až 0,45	150 až 275
0,45 až 0,80	275 až 425

Další důležitou teplotou je teplota interpass. Tento parametr udává teplotu vícevrstvého svaru a přiléhajícího základního materiálu bezprostředně před aplikací další svarové housenky. Teplota interpass může být uváděna pod názvem maximální teplota. Maximální teplota musí být měřena na svarovém kovu, nebo bezprostředně sousedícím základním materiálem. Na měření této teploty je možné použít termokřídý, dotykový teploměr, termočlánek nebo bezdotyková zařízení.

3.1 Vliv jednotlivých prvků na svařitelnost [43], [16]

Svařitelnost uhlíkových ocelí je přímo ovlivňována jejich chemickým složením. Vliv jednotlivých prvků je následující:

- **Uhlík C** – Se zvyšujícím se obsahem uhlíku se sice zvyšuje mez kluzu a tvrdost, ale plastické schopnosti ocelí se snižují. S rostoucím obsahem uhlíku se také zvyšuje náchylnost na vznik zakalení oceli. Tvrdost vznikajícího martenzitu se v závislosti na obsahu uhlíku zvyšuje. V teplotně ovlivněné oblasti se zároveň zvyšuje náchylnost na vznik studených trhlin.

- **Křemík Si** - V nelegovaných uhlíkových ocelích zvyšuje pevnost feritu. Zároveň působí silně dezoxidačně. Nedostatek křemíku, pod 0,1 hm. %, vede k neuklidněné oceli a zároveň horní hranice křemíku je omezena na 0,45 hm. %.
- **Fosfor P** - Se zvyšujícím se obsahem fosforu roste mez kluzu i mez pevnosti. Zároveň se zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi, především pokud se v oceli nachází měď. Přítomnost fosforu snižuje plastické možnosti ocelí. Způsobuje zkřehnutí za studena, a proto se u nelegovaných ocelí omezuje na maximální obsah 0,03 hm. %. Fosfor způsobuje zkřehnutí feritu, a to vede ke křehkým lomům, které lze prokázat prudkým snížením hodnot vrubové houževnatosti za vyšších teplot.
- **Síra S** - Může být do nelegovaných ocelí přidávána úmyslně s účelem zlepšit obrobitelnost. Vysoký obsah síry vede k náchylnosti svařované oceli na vznik teplých trhlin. Při vysokém obsahu síry působí příznivě přítomnost manganu, který částečně eliminuje možnost vzniku teplých trhlin. U nelegovaných ocelí má výt maximální obsah síry 0,03 hm. %.
- **Mangan Mn** - Dostatek manganu v oceli zvyšuje mez kluzu i pevnosti, aniž by byla snížena schopnost plasticity materiálu. Nelegované oceli mají obvyklý obsah manganu mezi 0,3 až 1,7 hm. %. Mangan zároveň působí jako dezoxidační činidlo a společně s křemíkem jsou používány na uklidnění ocelí. Síra se váže na mangan za tvorby MgS.
- **Měď Cu** - Do nelegovaných ocelí se měď dostává se vsázkou, která může obsahovat stopová procenta mědi. Při obsahu do 0,26 hm. % se pokládá přítomnost mědi na vliv mechanických vlastností jako neškodná. Zároveň měď při obsahu mezi 0,15 až 0,50 hm. % mírně snižuje rychlost koroze tím, že vytváří nepropustnou oxidickou vrstvičku, která chrání výrobek před další atmosférickou korozi.
- **Dusík N** - V ocelích se vyskytuje vždy v určité koncentraci v závislosti na technologii výroby. Maximální rozpustnost dusíku v oceli při 1600 °C je 0,04 hm. %. Podobně jako uhlík je dusík austenitotvorný prvek, a proto jeho přítomnost v uhlíkové oceli způsobuje rozšíření pole γ . V průběhu tuhnutí oceli se dusík vyskytuje ve formě nitridů, které mají podstatný vliv na mechanické vlastnosti, neboť zvyšují mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost. Současně snižují plastické vlastnosti, zejména tažnost a vrubovou houževnatost. Praktické projevy vylučování nitridů je stárnutí uhlíkových ocelí a křehkost v oblasti teplot 100 až 350 °C. Obzvláště nebezpečné je vylučování nitridů v úzkém pásmu okolo svaru, které může vést při nižších teplotách k úplnému rozrušení konstrukce.
- **Vodík H** - Stejně jako dusík, se i vodík v ocelích vyskytuje vždy. Vniká do nich rozkladem vzdušné vlhkosti při tavení, a to jak při výrobě, tak i při svařování. Mez rozpustnosti vodíku při 1530 °C je 28 cm³ ve 100 g železa. Vodík se v kovu může nacházet v rozpuštěném stavu, nebo může s kovy tvořit hydridy. Způsobuje vliv na svarový kov, a to na vznik pórů ve svařovaném kovu, na oduhličení svarového kovu, vznik trhlin ve svarovém kovu a vznik takzvaných rybích ok v teplotně ovlivněné oblasti. Při svařování může být více zdrojů vodíku, kterých je potřeba se vyvarovat:
 - Vlhkost obalu elektrod a tavidel,
 - Vlhkost na povrchu základního materiálu,

- Zbytky maziva po tažení ulpělé na povrchu přídavného materiálu, včetně drátu pro jádra elektrod,
- Vodík absorbovaný při moření i poměďování povrchů drátů,
- Zbytky po povrchových úpravách přídavných i základních materiálů ve vodných roztocích,
- Vlhkost v ochranných plynech,
- Obsah vodíku v základním materiálu,
- Korozní produkty,
- Barvy a mazadla na svarových plochách

U nelegovaných uhlíkových ocelí je nutno dávat pozor na stárnutí svarových spojů, které může být vyvoláno precipitací nitridů z přesyceného tuhého roztoku nebo deformací. Dalším problémem je zhrubnutí zrna v oblasti svarového spoje v důsledku rekrystalizace, která byla vyvolána předchozím tvářením za studena.

4. PARAMETRY, PODMÍNKY NAVAŘOVÁNÍ A EXPERIMENT

4.1 Porovnání a vyhodnocení parametrů navařování [16], [44]

Pro zhotovení experimentu byly na zkušební desku plechu z materiálu S355J2+N o tloušťce 20 mm navařeny dva tvrdokovové návary plněnými elektrodami, viz. tabulka 3. Byly navařeny dvě vrstvy, kde první vrstva činila tři návarové housenky, zatímco na horní, druhou vrstvu byly naneseny dvě housenky. Svařovací parametry těchto návarů jsou uvedeny v tabulce 5.

Tab. 5 Navařovací parametry [44]

Typ elektrody	U [V]	I [A]	v [mm/min]
Tubrodur 60 G M	27,3	190	67
Megafil A760M	25,9	190	60

Z důvodu možného výskytu trhlin ve svařované oblasti je možno dle potřeby využít přehřevu. Platí, že čím se daná ocel snadněji zakalí, tím roste nebezpečí vzniku křehkých zakalených struktur (martenzit a spodní bainit) v TOO svarového spoje a základního materiálu. Taková ocel se obtížně svařuje. K zjištění potřeby přehřevu slouží konstanta C_s , neboli uhlíkový ekvivalent, který vyjadřuje sklon k zakalení kovu ve svarové oblasti. Jedním ze základních technologických opatření pro zabránění vzniku trhlin ve svarových spojkách je použití přehřevu. Teplota přehřevu se vypočítá dle rovnice 3.1. Na výpočet rovnice 3.1 bude potřeba postupně využít rovnice 3.2, 3.3 a 3.4.

Výpočet:

Výpočet konstanty chemického složení (uhlíkový ekvivalent):

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360}$$

Kde: C, Mn, Cr, Ni, Mo – hmotnostní obsahy prvků uvedeny v tab. 2

$$C_c = \frac{360 \cdot 0,187 + 40 \cdot (1,5 + 0,036) + 20 \cdot 0,052 + 28 \cdot 0,005}{360}$$

$$C_c = \frac{6497}{18000}$$

Výpočet konstanty zahrnující tloušťku materiálu:

$$C_s = 0,005 \cdot s \cdot C_c$$

Kde: s – tloušťka základního materiálu (s = 20 mm)

$$C_s = 0,005 \cdot 20 \cdot \frac{6497}{18000}$$

$$C_s \doteq 0,0361$$

Výpočet konstanty C_p :

$$C_p = C_c + C_s$$

$$C_p = 0,0361 + \frac{6497}{18000}$$

$$C_p \doteq 0,397$$

Výpočet teploty přehřevu:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25}$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{0,397 - 0,25}$$

$$T_p \doteq 134,2 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow 150 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Jak navařovaná zkušební deska, tak i lopatky rotoru byly navařeny bez přehřevu. Ovšem z teoretického výpočtu přehřevu vyšlo, že lopatky rotoru by před navařováním měly být přehřívány na 134,2 °C. Prakticky přehřívát na hodnotu $T_p = 134,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ nelze. V praxi se používá zaokrouhlená hodnota nahoru jako násobek 50 °C. V tom případě je výsledná navrhovaná teplota přehřevu $T_p = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Dalším důležitým parametrem ovlivňujícím velikost tepelně ovlivněné zóny a změny materiálových vlastností je parametr tepelného příkonu. Tento parametr se označuje písmenem Q a udává množství přivedeného tepla do svarového spoje na jednotku jeho délky. Při svařování, či navařování více housenkami, je možné počítat s celkovým tepelným příkonem, který je roven součtu tepelných příkonů od každé housenky. Hodnota tepelného příkonu se podle ČSN EN 1011-1 pro obloukové svařování vypočítá dle vztahu:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad [kJ \cdot mm^{-1}] \quad (4.1.1)$$

Kde: Q – množství tepla přivedeného do sv. spoje na jednotku jeho délky [$kJ \cdot mm^{-1}$]

k – koeficient tepelné účinnosti metody svařování, viz tab. 6 [-]

U – napětí při svařování [V]

I – intenzita [A]

v – rychlost svařování [$mm \cdot s^{-1}$]

Tab. 6 Koeficienty tepelné účinnosti svařovacích metod [16]

Číslo metody	Metoda svařování	Koeficient k
121	svařování pod tavidlem drátovou elektrodou	1,0
111	ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	0,8
114	obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu	0,8
131	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu: MIG	0,8
135	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu: MAG	0,8
136	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,8
137	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,8
138	obloukové svařování kovem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,8
139	obloukové svařování kovem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,8
141	obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu: TIG	0,6
15	plazmové svařování	0,6

Výpočet množství vneseného tepla při navaření jedné housenky tvrdokovovou elektrodou s označením Tubrodur 60 G M:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3}$$

Koeficient k je zvolen dle tab. 6. Bylo navařeno metodou 138. Svařovací parametry (napětí, proud a svařovací rychlost) jsou v tab. 5. Pro přehlednost bude značení vneseného množství tepla Q pro elektrodu Tubrodur 60 G M nahrazeno značením Q_T .

$$Q_T = 0,8 \cdot \frac{27,3 \cdot 190}{67} \cdot 10^{-3}$$

$$Q_T = 0,061934 \doteq 0,062 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Na zkušební vzorek bylo navařeno celkově 5 housenek. Celkové vnesené teplo lze zjistit vynásobením počtu housenek s množstvím vneseného tepla od jedné housenky. Celkové vnesené teplo pro návar elektrodou Tubrodur 60 G M bude označeno jako Q_{CT} .

Výpočet Q_{CT} :

$$Q_{CT} = n \cdot Q_T$$

$$Q_{CT} = 5 \cdot 0,062$$

$$Q_{CT} = 0,31 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Z důvodu porovnání je vypočítáno vnesené teplo i pro elektrodu Megafil A760M. Vnesené teplo od jedné housenky je označeno jako Q_M a celkové vnesené teplo je označeno jako Q_{CM} . Potřebná data jsou opět v tabulkách 5 a 6.

Výpočet Q_M a Q_{CM} :

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3}$$

$$Q_M = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3}$$

$$Q_M = 0,8 \cdot \frac{25,9 \cdot 190}{60} \cdot 10^{-3}$$

$$Q_M = 0,0656133 \doteq 0,066 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

$$Q_{CM} = n \cdot Q_M$$

$$Q_{CM} = 5 \cdot 0,066$$

$$Q_{CM} = 0,33 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Pro návary je vždy vhodnější větší množství vneseného tepla, protože se lépe svařuje a vzniklý návar má menší náchylnost k praskání. Dle vypočítaných hodnot vyšlo, že návar plněnou kovovou elektrodou s označením Megafil A760M vnáší při navařování větší teplo než plněná kovová elektroda s označením Tubrodur 60 G M. Ovšem rozdíl hodnot vneseného tepla je tak nepatrný, že to na výsledný návar nebude mít žádný vliv. Z hlediska porovnání navařovacích parametrů lze tedy vyvodit, že **vliv na výsledný návar od obou elektrod je stejný**.

4.2 Porovnání a vyhodnocení ceny za použité přídatné materiály [45], [46]

Velmi významným porovnávacím kritériem je také cena svařovacích plněných elektrod. V tabulce 7 je porovnání dvou výše zmíněných návarů podle ceny. Cena elektrody je uváděna bez DPH za cívku o hmotnosti 16 kg. Lepší varianta z hlediska ceny je zvýrazněna zeleně.

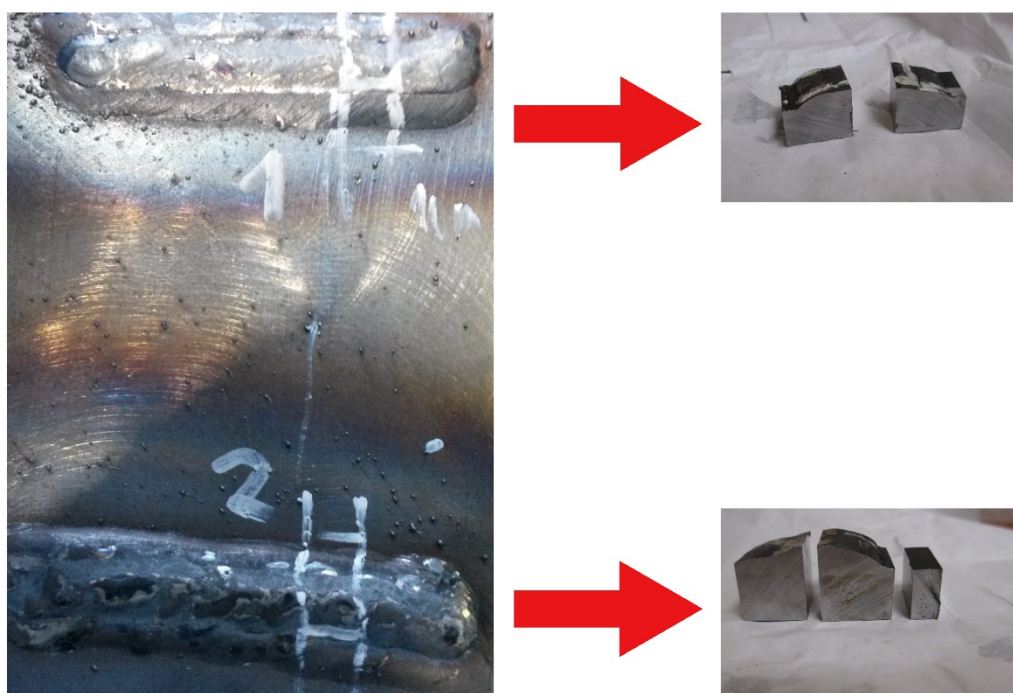
Tab. 7 Porovnání ceny plněných elektrod [45], [46]

Porovnání vneseného tepla	
Typ elektrody	Cena za jednu cívku [Kč]
Tubrodur 60 G M	3037
Megafil A760M	3760

Dle tab. 7 je vidět, že v **porovnání z hlediska ceny** za 16ti kg cívku **vychází lépe tvrdonávarová elektroda Tubrodur 60 G M**. Další náklady na zhotovení návaru (plat svářeče, příprava na svařování, spotřebovaná elektřina a množství spotřebovaného ochranného plynu) se měnit nebudou.

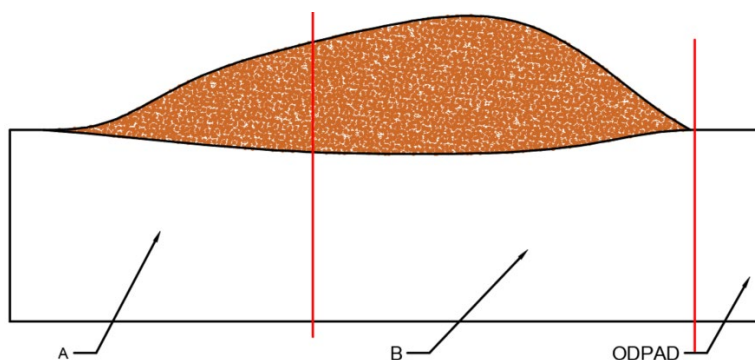
4.3 Porovnání a vyhodnocení makro a mikro struktury [47]

Následně z takto navařené desky byly odebrány dva vzorky s označením 1 a 2, které byly rozřezány na kotoučové manuální pile Labotom – 3 na menší části, viz obr. 28. Návar číslo 1 byl navařován plněnou elektrodou kovovým práškem pod označením Megafil A760M. Návar číslo 2 byl také navařen plněnou elektrodou kovovým práškem pod označením Tubrodur 60 G M.



Obr. 28 Nařezání zkušebních vzorků

Z důvodu bezproblémového umístění vzorků do lisovacího válce, poměrně malého průměru, přístroje ECOPRESS 100 byly vzorky rozřezány dle schématu znázorněného na obrázku 29. Při následném značení vzorků bylo využito schéma na obr. 29. Vzorek 1 je označen jako A1 a B1, zatímco vzorek 2 je označen stejným způsobem.



Obr. 29 Schématické znázornění řezu vzorku

Jakmile byly vzorky rozřezány na potřebné rozměry, byly vloženy do přístroje ECOPRESS 100, viz obr. 30. Společně s rozřezaným vzorkem byl, dle potřebného množství, do lisovacího válce vsypán granulát pryskyřice, vhodný k lisování za tepla od firmy Metkon. Takto připravený vzorek byl lisován při teplotě 200 °C a tlaku 240 barů po dobu 3 minut a 30 sekund.



Obr. 30 Lisovací přístroj ECOPRESS 100

Takto slisované vzorky byly dále obroušeny na pomaloběžné kotoučové brusce FERM BGM 1021, viz obr. 31, z důvodu odstranění přebytečné pryskyřice, která by mohla dělat problémy v následném broušení.



Obr. 31 Broušení na brusce FERM BGM 1021

Následně byly vzorky broušeny na kotoučové brusce Struers LaboPol-5. Každý vzorek byl broušen na brusných kotoučích SiC s hrubostí 80 (2 minuty), 220 (5 minut), 800 (5 minut) 1200 (5 minut). V průběhu broušení na uvedených kotoučích bylo použito přívodu kohoutkové vody z důvodu chlazení. Pro dokončovací broušení byly použity velmi jemné brusné papíry s velikostí největšího brusného zrna $9\mu\text{m}$ a $3\mu\text{m}$. Při broušení takto jemnými brusnými papíry nelze k chlazení použít kohoutková voda, ale musí být použito speciální pasty. Na obr. 32 a 33 je vidět přehled brusných kotoučů a kotoučová bruska Struers Labopol 5.



Obr. 32 Brusné kotouče



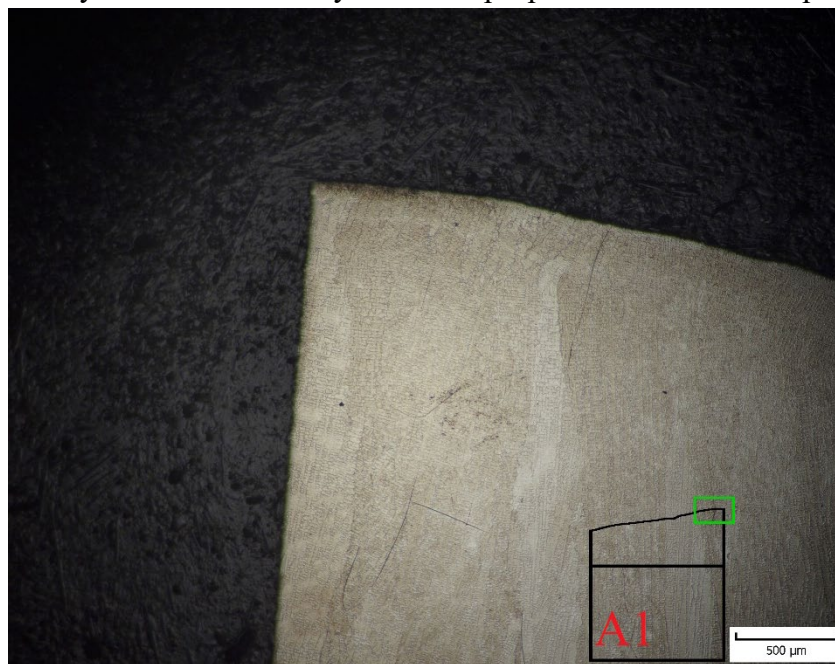
Obr. 33 Kotoučová bruska Struers

Vybroušené vzorky byly následně leptány leptadlem s názvem Kalling (roztok kyseliny chlorovodíkové) po dobu cca 5 sekund. Po naleptání byly za pomoci světelného mikroskopu zkoumány na úrovni makro a mikro struktury.

Makroskopická kontrola se provádí buď prostým okem, nebo při malém zvětšení (obecně do 50x zvětšení), v naleptaném nebo nenaleptaném stavu. Makroskopická zkouška byla provedena v naleptám stavu.

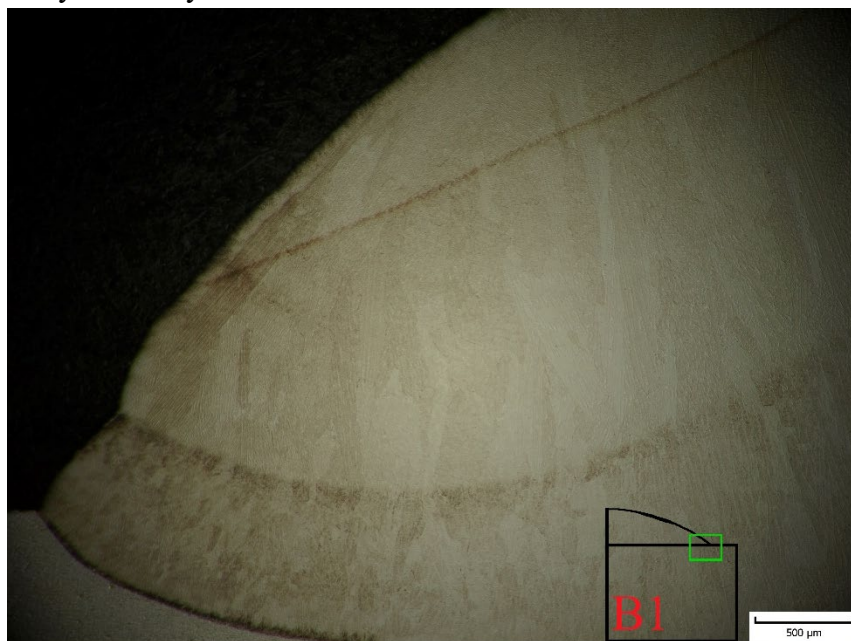
Na obrázku 34 a 35 jsou ukázány makrostruktury zkoumaného vzorku s označením 1 při 40x zvětšení, který je navařen plněnou elektrodou Megafil A760M.

Na obr. 34 je vidět makrostruktura navařeného kovu. Na obrázku jsou vidět drobné černé body, které by mohly znamenat nečistoty zavedené při procesu nebo drobné póry.



Obr. 34 Makrostruktura vzorku A1

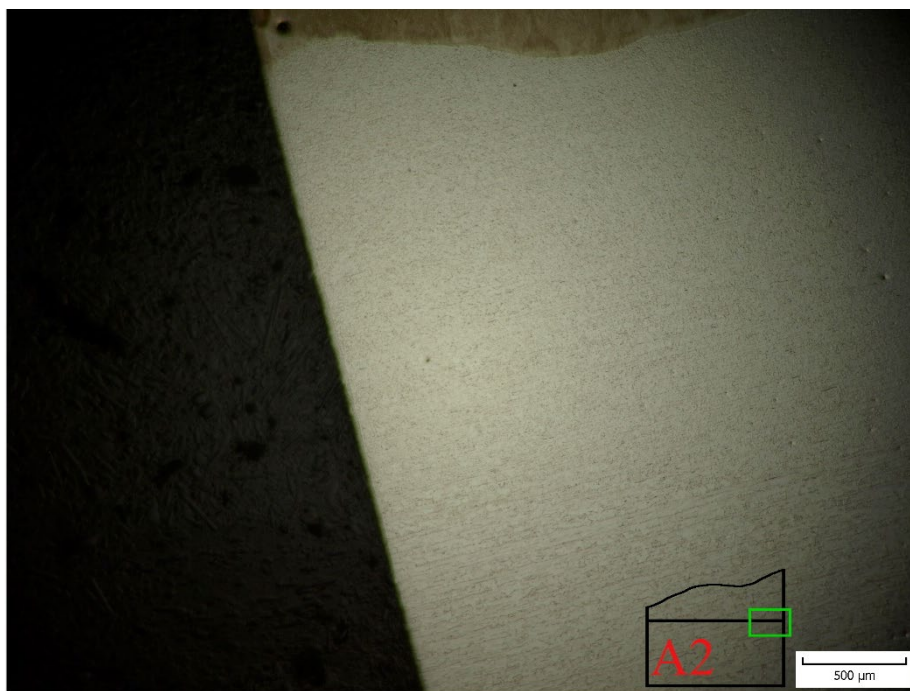
Obrázek 35 ukazuje makrostrukturu vzorku B1. Na této fotce je vidět hranice dvouvrstvého návaru. Také je možné si povšimnout jemně černého rozmezí mezi návarem a základním materiálem, což by mohla být zavařená struska.



Obr. 35 Makrostruktura vzorku B1

Obrázek 36 a 37 zobrazuje makrostrukturu vzorku číslo 2 při 40x zvětšení, který je navařen plněnou elektrodou s označením Tubrodur 60 G M.

Na obr. 36 je možno vidět makrostruktura vzorku A2. V horní části si lze povšimnout zjevné vady, póru. Tato vada může být potenciálně nebezpečná a může omezovat životnost návaru. Zároveň je zřetelná TOO, po které je vidět strukturu základního materiálu, který byl válcován.



Obr. 36 Makrostruktura vzorku A2

Obrázek 37 zobrazuje makrostruktury vzorku B2 na které je zobrazena jasně viditelná hranice druhého návaru. Vyskytují se zde také malé černé tečky, které by mohly značit výskyt pórů, nebo zanesení vzorku v průběhu provádění experimentu.



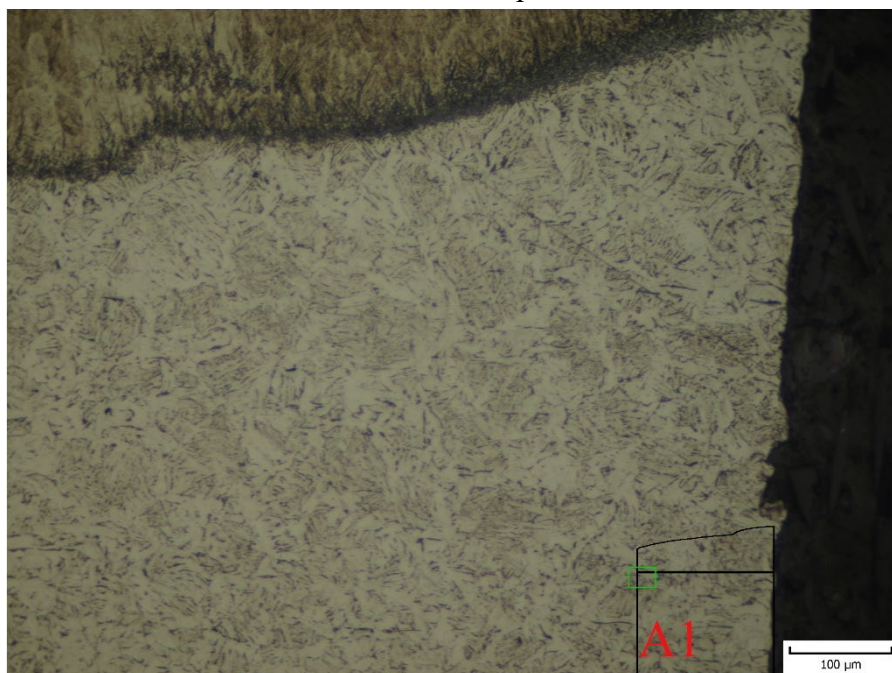
Obr. 37 Makrostruktura vzorku B2

Provedené vizuální kontroly ukazují, že makrostruktura obou návarů má drobné odlišnosti. U vzorku navařeném plněnou elektrodou Tubrodur 60 G M byl vidět na rozmezí ZM a návaru

pór, který by mohl být nebezpečný pro životnost návaru hlavně při zatížení. Zatímco na vzorku navařeném plněnou elektrodou Megafil A760M byla vidět tmavá oblast pod návarem, která by mohlo značit zavařenou strusku.

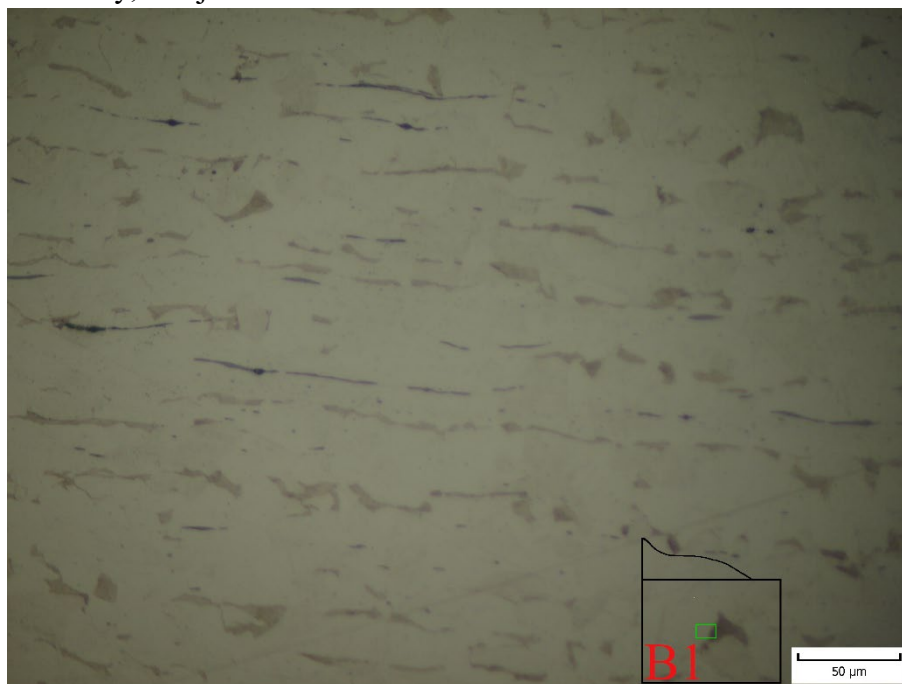
Mikroskopická kontrola zkušebního vzorku probíhá při zvětšení více jak 50x. Hodnotí se struktura materiálu, velikosti zrn a případné vměstky.

Obrázek 38 ukazuje naleptanou strukturu vzorku při 200x zvětšení. Je možno vidět perliticko-feritickou strukturu základního materiálu pod návarem.



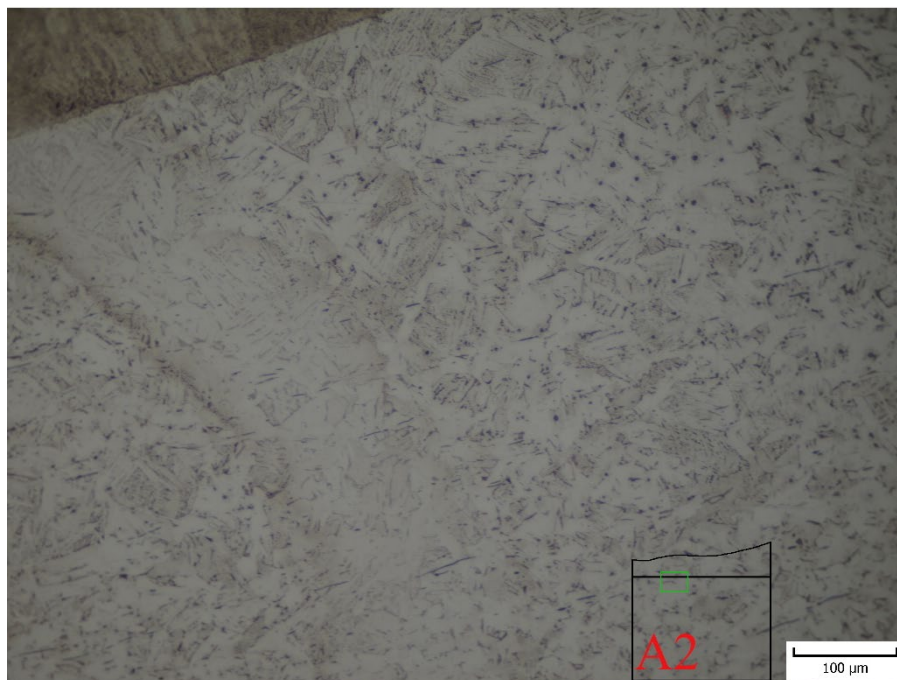
Obr. 38 Mikrostruktura vzorku A1

Na obr. 39 je při 400x zvětšení zobrazena mikrostruktura základního materiálu. Základní materiál je válcovaný, což je vidět na tvaru zrn.



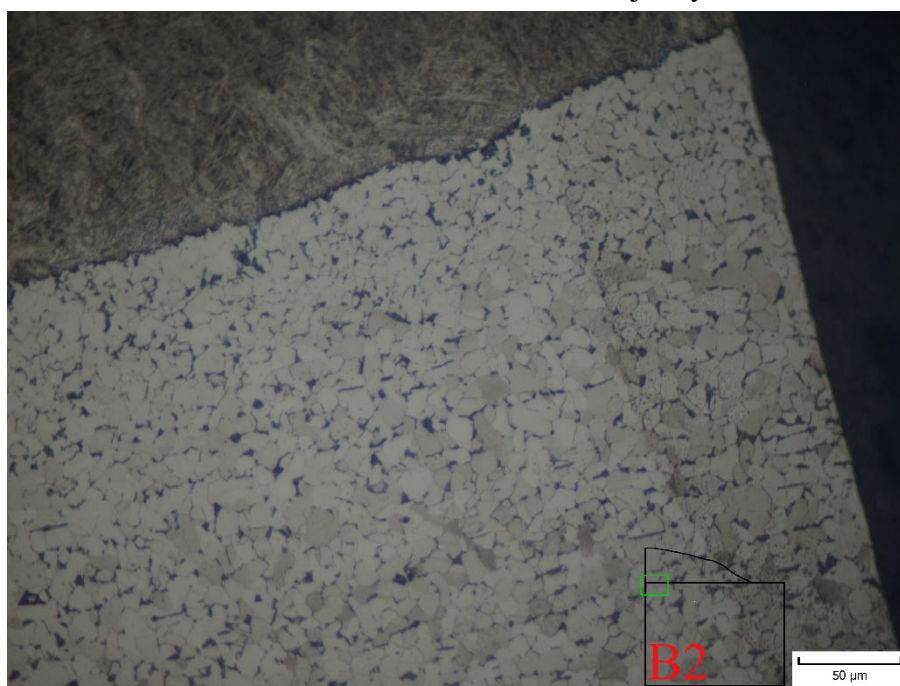
Obr. 39 Mikrostruktura vzorku B1

Mikroskopické zvětšení (200x) pro vzorek 2 je zobrazeno na obr. 40. Na tomto obrázku je také vidět perliticko-feritická struktura v základním materiálu a změna velikosti a tvaru zrna základního materiálu.



Obr. 40 Mikrostruktura vzorku A2

Na obr. 41 je možno vidět, při 400x zvětšení, jiný tvar zrn než na předchozích snímcích. Zároveň je možno vidět velké množství vměstků, které se objevily na hranicích zrn.

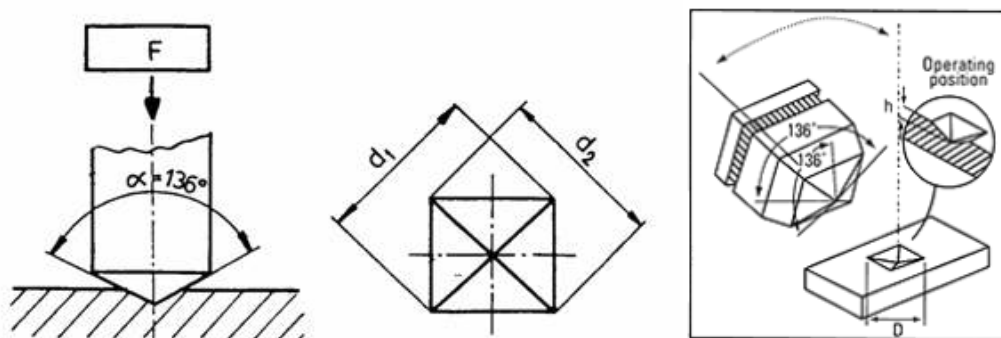


Obr. 41 Mikrostruktura vzorku B2

Po provedení kontroly mikrostruktury bylo zjištěno, že pod hranicí navaření se u obou vzorků změnil tvar původního zrna. Při porovnání mikrostruktury obou návarů jsem došel k závěru, že množství vměstků i velikosti výsledných zrn je téměř stejné.

4.4 Porovnání a vyhodnocení tvrdosti [18], [19], [47], [48], [49]

Pro měření tvrdostí 4 vzorků byla použita metoda Vickerse. Podstatou této metody je diamantové vnikající těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a daným vrcholovým úhlem 136° mezi protilehlými stěnami je vtlačováno do povrchu zkušebního tělesa. Diamantové těleso musí klesat s konstantní rychlostí. Následně je měřena uhlopříčka vtisku, která je viditelná (světelným mikroskopem) po odlehčení zkušebního tělesa. Na obr. 42 je schematicky zobrazena metoda měření tvrdosti dle Vickerse.

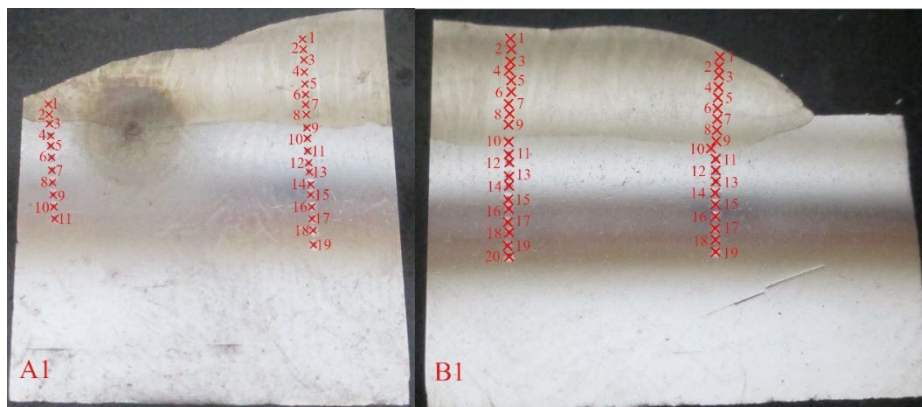


Obr. 42 Schéma metody měření tvrdosti dle Vickerse [49]

Měření bylo provedeno na přístroji Zwick 3212 se softwarovou podporou systému testXpert pro měření uhlopříčky a následný přepočet tvrdosti. Z důvodu vyšší předpokládané tvrdosti navařovaného materiálu bylo zvoleno zatížení 10 kg, tedy výsledná změřená tvrdost se značí HV_{10} .

Naměřená tvrdost pro vzorek navařený plněnou elektrodou značky **Megafil A760M**:

Na obr. 43 je schematicky znázorněno umístění vpichů pro měření tvrdosti. Cílem měření je změřit tvrdost pro dvouvrstvý i jednovrstvý návar. Avšak některé návary svým způsobem navaření neumožňují měřit jednovrstvý návar, viz obr 43 vzorek B1. Vpichy byly prováděny vždy 0,5 – 1 mm od povrchu návaru a s rozmezím cca 0,5 mm mezi dalším vpichem. Výsledné tvrdosti pro návar Megafílem A760M jsou zpracovány do v tabulce 8.



Obr. 43 Umístění vpichů pro vzorek 1

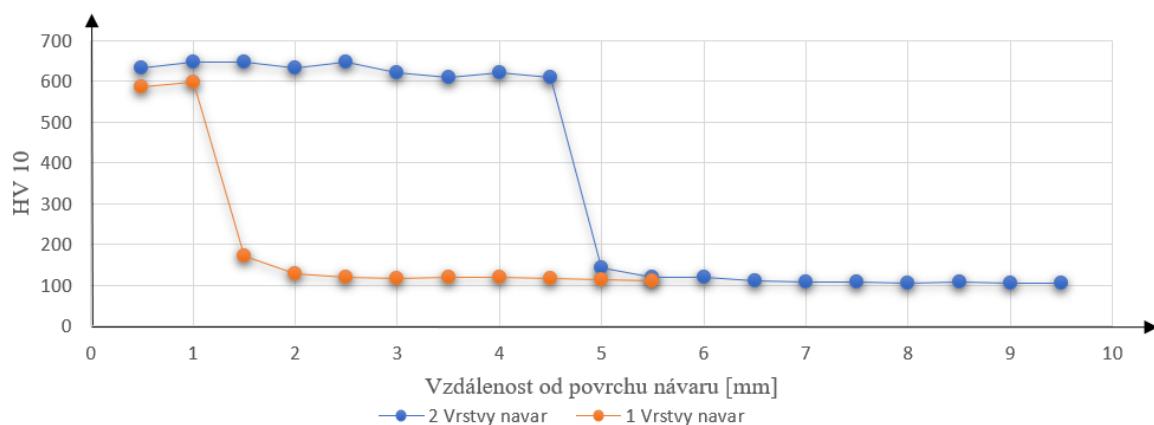
Tab. 8 Výsledné tvrdosti návaru Megafil A760M

Naměřené tvrdosti návaru elektrodou Megafil A760M				
Číslo měření	A1		B1	
	2 vrstvý návar	1 vrstvý návar	2 vrstvý návar	1 vrstvý návar
1	634	585	631	606
2	647	599	588	606
3	647	171	620	620
4	634	128	630	620

5	647	120	620	620
6	620	118	620	609
7	609	120	620	609
8	620	119	620	609
9	609	117	620	559
10	142	113	141	411
11	119	112	113	110
12	119	-	110	110
13	112	-	112	110
14	108	-	107	107
15	109	-	106	107
16	106	-	101	107
17	107	-	110	102
18	105	-	102	102
19	105	-	106	102
20	-	-	102	-

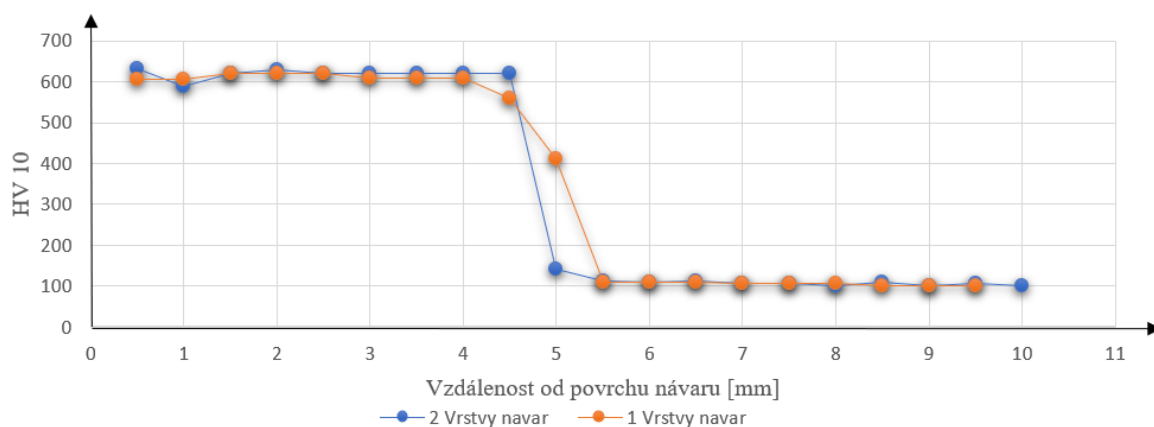
Z tabulkových hodnot jsou následně zpracovány grafy, viz obr. 44 a 45, závislosti průběhu tvrdosti na vzdálenosti od povrchu svaru.

Průběh tvrdosti návaru A1 v závislosti na vzdálenosti od povrchu



Obr. 44 Grafická závislost naměřené tvrdosti na vzdálenosti pro vzorek A1

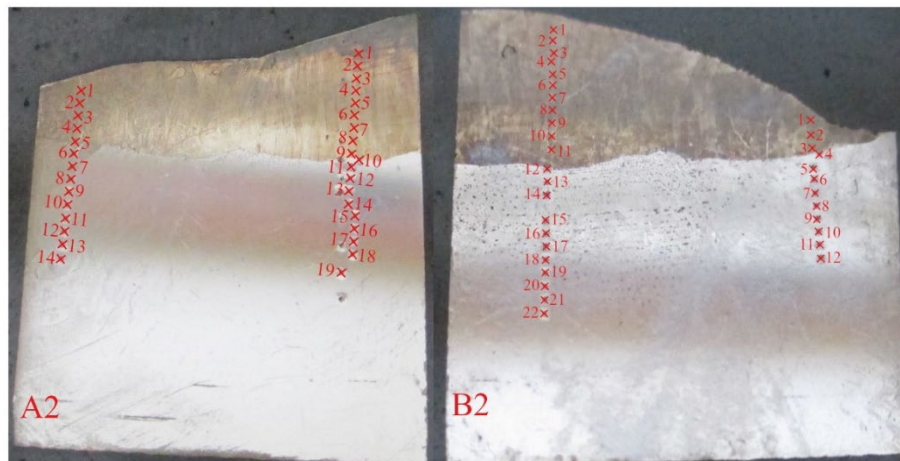
Průběh tvrdosti návaru B1 v závislosti na vzdálenosti od povrchu



Obr. 45 Grafická závislost naměřené tvrdosti na vzdálenosti pro vzorek B1

Naměřená tvrdost pro vzorek navařený elektrodou značky **Tubrodur 60 G M**:

Stejně jak u navařování elektrodou Megafil A760M, i u návaru číslo 2 bylo zapotřebí změřit tvrdost pro dvou i jednovrstvý návar. Na obr. 46 jsou schematicky znázorněny vpichy z měření tvrdosti. Stejně jako u vzorku 1 byly vpichy prováděny 0,5 až 1 mm od povrchu návaru a vždy po 0,5 mm směrem do základního materiálu. Výsledky zkoušky tvrdosti dle Vickerse jsou uvedeny v tabulce číslo 9.



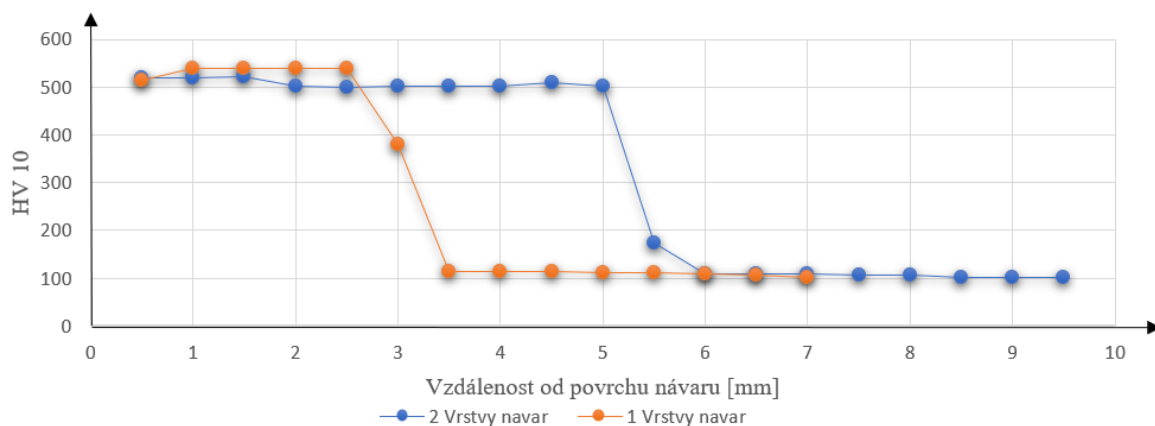
Obr. 46 Umístění vpichů pro vzorek 2

Tab. 9 Výsledné tvrdosti návaru Tubrodur 60 G M

Naměřené tvrdosti návaru elektrodou Tubrodur 60 G M				
Číslo měření	A2		B2	
	2 vrstvý návar	1 vrstvý návar	2 vrstvý návar	1 vrstvý návar
1	520	515	496	382
2	520	538	496	389
3	521	538	496	447
4	501	538	496	138
5	500	538	501	115
6	501	378	501	109
7	501	114	496	105
8	501	114	500	105
9	509	114	496	95
10	501	111	501	96
11	173	111	501	97
12	109	110	138	98
13	110	106	103	-
14	110	103	102	-
15	107	-	84	-
16	107	-	103	-
17	102	-	95	-
18	103	-	99	-
19	103	-	97	-
20	-	-	98	-
21	-	-	98	-
22	-	-	98	-

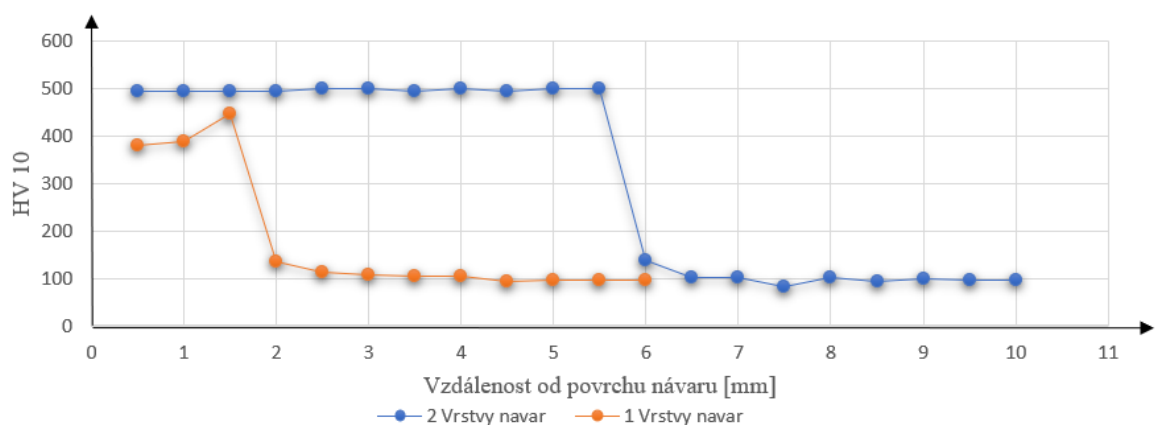
Z tabulkových hodnot jsou následně vypracovány grafické závislosti tvrdosti na vzdálenosti od povrchu návaru, viz obr. 47 a 48.

Průběh tvrdosti návaru A2 v závislosti na vzdálenosti od povrchu



Obr. 47 Grafická závislost naměřené tvrdosti na vzdálenosti pro vzorek A2

Průběh tvrdosti návaru B2 v závislosti na vzdálenosti od povrchu



Obr. 48 Grafická závislost naměřené tvrdosti na vzdálenosti pro vzorek B2

V tab. 10 jsou porovnané maximální naměřené tvrdosti návarů obou elektrod s údaji z materiálových listů. U elektrody Megafil A760M byl rozsah tvrdosti daný výrobcem v HRC. Tvrdost u této elektrody byla převedena z HV na HRC a je uvedena v tabulce u dané hodnoty v závorce.

Tab. 10 Porovnání maximálních tvrdostí návarů s materiálovým listem [47], [18], [19]

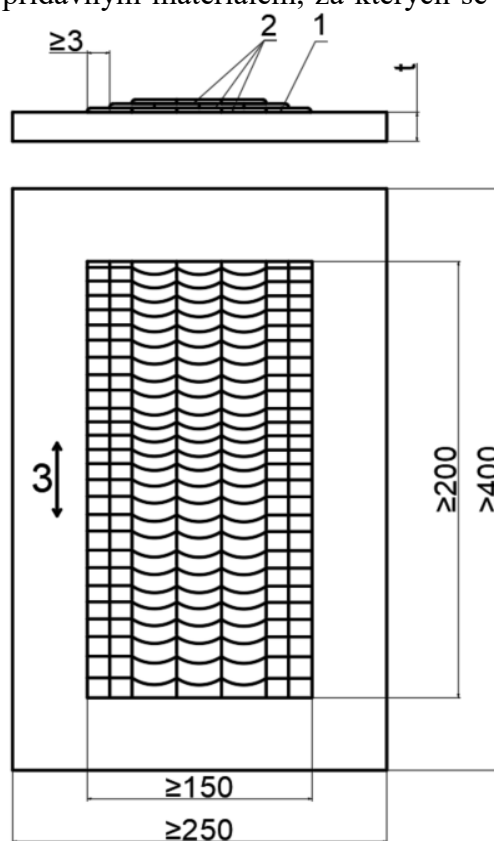
Typ elektrody	Maximální naměřená tvrdost	Rozsah tvrdosti daný výrobcem
Tubrodur 60 G M	538 HV	550 – 650 HV
Megafil A760M	647 HV (58 HRC)	57 – 63 HRC

V porovnávací tabulce číslo 10 je vidět, že návar plněnou elektrodou značky Megafil A760M je o více než 100 HV tvrdší než návar plněnou elektrodou značky Tubrodur 60 G M. Z porovnání tvrdostí vyplývá, že elektroda s označením **Megafil A760M** je z hlediska tvrdosti návaru **vhodnější**. Doporučuji na výslednou kvalifikaci použít plněnou elektrodu Megafil A760M.

5. CERTIFIKACE NAVAŘOVÁNÍ [50]

Kvalifikace a následné certifikace návarů se provádí dle normy ČSN EN ISO 15614-7. V této normě je detailně specifikováno, jakým způsobem se kvalifikují návary, kterými zkouškami a za jakých podmínek.

Pro úspěšnost kvalifikační zkoušky postupu svařování musí být zkušební kus navařen za stejných podmínek, stejnou technologií a se stejným přídavným materiálem, za kterých se to bude navařovat ve výrobě. Zkouška postupu svařování musí být provedena na normalizovaných kusech. Počet kusů a jejich musí být dostačující, aby bylo možné provést všechny požadované zkoušky. Tloušťky zkušebních kusů musí být vybrány dle rozsahu kvalifikace. Pokud je při navařování ve výrobě použita mezivrstva, musí se použít i při svařování zkušebního kusu. Na obr. 48 je ukázka zkušebního plechu pro navařování. Číslo 1 na obrázku značí použití mezivrstvy, pokud je nezbytná. Označení číslem 2 je počet vrstev podle pWPS, nebo tloušťka krycí vrstvy návaru. Číslo 3 udává směr svařování. Písmenem „t“ je na obrázku značena tloušťka základního materiálu. Rozměry vzorku i navařované oblasti jsou volitelné, pouze se musí dodržet minimální parametry. Rozměry na obr. 48 jsou v mm. Příprava a svařování zkušebních vzorků musí být provedena v souladu s předběžnou specifikací postupu svařování (pWPS) a za všeobecných podmínek které musí prezentovat. Svařování a následné zkoušky zhotovených svarů, popřípadě návarů musí být osvědčeno zkušebním orgánem, nebo zkušební organizací.



Obr. 49 Zkušební kus [50]

Následná kontrola a zkoušení zhotoveného návaru musí být provedena dle požadavků tabulky 11.

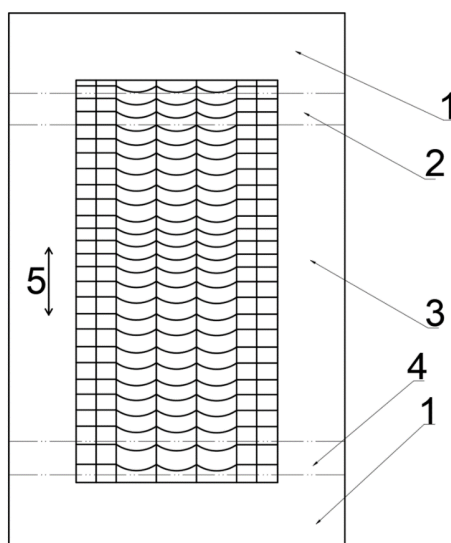
Tab. 11 Kontrola a zkoušení zkušebních svarů pro tvrdonávary [50]

Zkušební kus	Druh zkoušky	Rozsah zkoušení	Poznámka pod čarou
Tvrdonávar	- Vizuální kontrola (VT)	100 %	
	- Zkouška na povrchové trhliny (MT/PT)	100 %	b
	- Makroskopická kontrola	1 vzorek	
	- Zkouška tvrdosti	1 měření	

Pozn. b – Kapilární zkouška (PT) nebo zkoušení magnetickou práškovou metodou (MT). Pro nemagnetické materiály, kapilárním zkoušením.

Všechny specifikované nedestruktivní zkoušky (NDT) z tabulky 10 musí být provedeny na zkušebních vzorcích až po tepelném svařování návaru a před vyřezáním zkušebních vzorků.

Zkušební vzorky musí být odebrány dle obrázku 49 až po provedení všech NDT. Číslo 1 na obr. 49 značí odpad, který přesahuje 25 mm naneseného kovu. Oblast 2 značí místo odebrání 1 vzorku pro zkoušky bočním ohybem. Z oblasti 3 je vybrán jeden vzorek na makroskopickou kontrolu, jeden vzorek na zkoušku tvrdosti, dalších pár vzorků na požadovaný chemický rozbor,

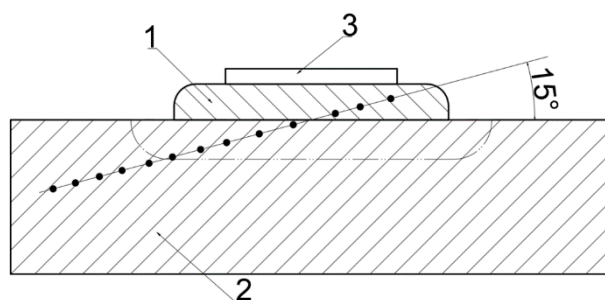


Obr. 50 Umístění vzorků pro navařování na plech [50]

feritové číslo a vzorky na opakovanou zkoušku. Z oblasti 4 se bere vzorek pro zkoušku bočním ohybem. Číslo 5 udává směr svařování.

Destruktivní zkoušky (DT) musí splňovat požadavky v tab. 10, nebo mohou být požadovány doplňující zkoušky. Při makroskopické kontrole musí být vzorek na jedné straně naleptán dle ISO 17639 tak, aby byla jasně patrná hranice natavení, TOO a způsob kladení vrstev návaru. Kontrola makrostruktury musí zahrnovat neovlivněný zákl. materiál a návar musí být zdokumentován ve zprávě nejméně jedním snímkem makrostruktury.

Další destruktivní zkouškou je zkouška tvrdosti. Zkouší se dle Vickerse HV₁₀ nebo HV₅ a musí být vykonána dle normy ISO 9015-1. Výsledky musí být řádně zaznamenány. V každém případě musí být tvrdost měřena v linii vpichů pod úhlem 15° k povrchu, včetně krycí vrstvy, TOO a ZM. U tvrdonávaru musí být provedeno nejméně 5 vtisků na mechanicky opracovaném povrchu zkušebního kusu. Vtisky tvrdosti musí být provedeny dle obr. 50 pokud není specifikováno jinak. Na obr. 50 pod značením 2 je základní materiál, 1 mezivrstva, pokud je nutná a 3 tvrdonávarová nebo korozivzdorná vrstva. Vzdálenost mezi měřenými body podél 15° linie je přibližně 1 mm.



Obr. 51 Příčná tvrdost krycí vrstvy [50]

Pro každou zkoušku existují kritéria přípustnosti. Pro nedestruktivní zkoušení (NDT), pokud není specifikováno jinak, jsou kritéria přípustnosti zobrazena v tab. 11.

Tab. 12 Kritéria přípustnosti pro NDT [50]

Metoda NDT	Tvrdonávar
Vizuální zkouška	Lineární a jiné rovinné vady jsou nepřipustné.
	Povrchové póry ≤ 2 mm jsou přípustné
Kapilární zkouška	Stupeň přípustnosti 2X dle ISO 23277
Magnetické práškové zkoušení	Stupeň přípustnosti 2X dle ISO 23278
Ultrazvukové zkoušení	Jakékoliv indikace, které udávají signál větší než ten, který je specifikován ve výrobní normě, nejsou přípustné.

Pokud není specifikováno jinak, kritéria přípustnosti pro destruktivní zkoušky (DT) musí být v souladu s tab. 12. Pro tvrdonávar musí být specifikovány klasifikace a rozměry vad.

Tab. 13 Kritéria přípustnosti pro DT [50]

Metoda DT	Tvrdonávar
Makroskopická kontrola	Specifikováno pro lineární vady.
	Jednotlivé póry nebo shluky pórů ≤ 2 mm jsou přípustné
Zkouška tvrdosti	Hodnoty tvrdosti pro základní materiál a TOO nesmí překročit hodnoty v tab. 13.
	Musí být stanoveny minimální hodnoty povrchové tvrdosti.

Tab. 14 Maximální hodnoty tvrdosti pro základní materiál [50]

Materiálové skupiny ISO/TR 15608	Tepelně nezpracováno (HV 5 nebo HV 10)	Tepelně zpracováno (HV 5 nebo HV 10)
1 ^a , 2 ^b	380	320
3 ^b	450	380
4, 5	380 ^c	350 ^c
6	-	350 ^c
9, 1	350	300
9, 2	450	350
9, 3	450	350

Pozn.: a – pokud jsou zkoušky tvrdosti požadovány, b – pro ocel s minimální $R_{eH} > 890$ MPa musí být maximální hodnoty specifikovány, c – po dohodě může být maximální hodnota překročena.

Při provádění experimentu, viz kapitola 4, nebylo dodrženo striktního postupu dle dané normy ISO 15614-7. Nebyly splněny tyto body:

- Zkouška postupu svařování se musí pro každý návar provést na samostatném normalizovaném zkušebním kusu, viz obr 48. Problematické bylo, že obě housenky byly navařeny na jednom kusu plechu. Správně: Každá zkoušená elektroda musí mít svou vlastní zkušební desku.
- Poslední vrstva návarové housenky měla jen dvě housenky. Správně: Poslední vrstva musí mít minimálně tři svarové housenky.
- Nebyla provedena vizuální zkouška ani zkouška na povrchové trhliny. Správně: Provést vizuální zkoušku (výsledek musí být na 100 %) a zkoušku na povrchové trhliny (na 100 %).
- Nebyla provedena zkouška bočním ohybem. Správně: Provést zkoušku ohybem navařeného vzorku dle obr. 49.
- Zkouška tvrdosti nebyla provedena dle dané normy. Správně: Vykonat zkoušku tvrdosti dle obrázku 50.

Po úpravě uvedených nedostatků by bylo možné splnit veškeré podmínky dané normou pro kvalifikaci a certifikaci návarů. Byla tedy vyhotovena pWPS, viz příloha. Podle které by se následně dala provést kvalifikace postupu navařování – WPQR.

6. ZÁVĚRY

Bakalářská práce je zaměřena na technologii renovací navařováním. Renovovanou součástí jsou lopatky rotoru roztrískovače, které byly navařeny metodou FCAW bez přehřevu. Vzhledem k výsledkům experimentu a teoretickému výpočtu je přehřev na teplotu $T_p = 150\text{ °C}$ nutný. Doporučuji jej provádět plamenem.

Pro navaření lopatek rotoru roztrískovače se rozhodovalo mezi dvěma tvrdonávarovými plněnými elektrodami: Tubrodur 60 G M a Megafil A760M. Obě plněné elektrody vytváří návar z tvrdokovu na bázi chromu. Na zkušební plech o tloušťce 20 mm byly navařeny dva dvouvrstvé návary, každý jinou elektrodou. Při porovnávání parametrů bylo zjištěno, že návar elektrodou Tubrodur 60 G M vnáší do místa svaru menší teplo než navařování elektrodou Megafil A760M. Rozdíl vneseného tepla byl ale velmi malý. Dále byla porovnána cena, kde vyšla elektroda Tubrodur 60 G M levněji.

Navařená zkušební deska byla následně rozřezána na zkušební vzorky a hodnocena makro/mikro struktura a výsledná tvrdost. Při hodnocení makro struktury byla nalezena vada (pór) na vzorku, který byl navařen plněnou elektrodou Tubrodur 60 G M. Na vzorku, který byl navařen plněnou elektrodou Megafil A760M, se na hranici svarového kovu a základního materiálu objevovaly černé oblasti, nejspíše zavařená struska. Při hodnocení mikrostruktury byly oba vzorky téměř totožné. Rozdíl byl v porovnání tvrdostí, které byly měřeny liniově od povrchu návaru do základního materiálu. Tvrdosti byly měřeny pro 1 vrstvý návar a 2 vrstvý návar. Při kontrole tvrdostí pro vzorek navařený elektrodou Megafil A760M 2 vrstvý návar vykazoval vyšší tvrdosti než jednovrstvý. Jednovrstvý návar zhotovený elektrodou Tubrodur 60 G M u vzorku A2 vykazoval vyšší tvrdosti než dvouvrstvý návar zhotovený stejnou elektrodou. Při celkovém porovnání tvrdostí pro elektrody Tubrodur 60 G M a Megafil A760M byl návar zhotoven elektrodou Megafil A760M tvrdší o 109 HV.

Po celkovém zhodnocení makro/mikro struktury, ceny, výsledné tvrdosti a s ohlednutím na to, že lopatky rotoru roztrískovače musí odolávat velkým opotřebením při provozu je z hlediska životnosti zhotoveného návaru plněná elektroda Megafil A760M lepší volba než plněná elektroda Tubrodur 60 G M. Dále doporučuji použít teplotu přehřevu $T_p = 150\text{ °C}$. S tímto účelem byla vypracována pWPS, viz příloha.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [51]

1. BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2000, 213 s.: il.; 30 cm. ISBN 80-85771-72-1.
2. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s.: il. ISBN 80-85771-81-0.
3. Welding. In: *Byers Technical Institute* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://byerstechinstitute.com/home/welding/>
4. Svařování laserovým paprskem. In: *TRUMPF* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/
5. Laserové práškové navařování. In: *TRUMPF* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-deposition-lmd/
6. Friction stir welding at TWI: TWI Ltd. In: *News powered by Cision* [online]. 1. 11. 2012 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://news.cision.com/twi-ltd/i/friction-stir-welding-at-twi,c1257482>
7. KUBÍČEK, Jaroslav. *Renovace: Studijní opora* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2018 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu Renovace_a_povrchove_upravy_renovace_2018_kubicek.pdf
8. Prezentace CZ. In: *PILANA a.s.* [online]. 2008 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.pilana.cz/cz/vseobecne-informace>
9. Roztrískovací segmenty. In: *PILANA a.s.* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.pilana.cz/cz/sk-pilove-kotouce-a-segmenty-pro-roztriskovace>
10. LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. šesté vydání. Úvaly: ALBRA, 2017, 943 s. ISBN 978-80-7361-111-8.
11. Porovnání konstrukčních ocelí. *Bohdan Bolzano, s.r.o.* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/HM%20nove/Porovnani_konstrukcnich_oceli.pdf
12. *Inspekční certifikát*. Vítkovice Steel a.s., 2016, 2 s.
13. VÍTKOVICE STEEL. *Produktový katalog plechy* [online]. 2019, 40 s. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://www.vitkovicesteel.com/data/soubory/plechy/Katalog_plechey_A4_2018_cely_o_prava1-40_2_tisk6_web.pdf
14. ČSN EN ISO 4063. *Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování: Česká technická norma*. Červenec. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
15. SIGMUND, Marián. *Technologie svařování: Studijní opora*.
16. PILOUS, V., J. KOUKAL, D. SCHWARZ a J. HAJDÍK. *Materiály a jejich chování při svařování: pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*. Ostrava, 2016, 404 s.
17. SIGMUND, Marián. *Specifikace svařovacího postupu dle EN ISO 15 609-1: Návar tvrdokovem*. 7. 4. 2019, 1 s.
18. ESAB. *OK Tubrodur 60 G M: Informace o plněné svařovací elektrodě*.
19. WIRPO. *Megafil A 760 M: Informace o plněné svařovací elektrodě*. 1 s. Dostupné také z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/
20. CHAPTER. Flux Cored Arc Welding Equipment, Setup, and Operation OBJECTIVES KEY TERMS AWS SENSE EG2.0. In: *Docplayer* [online]. [cit. 2019-05-22].

- Dostupné z: <https://docplayer.net/22499171-Chapter-flux-cored-arc-welding-equipment-setup-and-operation-objectives-key-terms-aws-sense-eg2-0.html>
21. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ, Milan HORÁČEK, Ladislav ZEMČÍK, Bohumil KANDUS, Jaroslav KUBÍČEK, Evžen VYPLAŠIL a Ladislav ŽÁK. *Technologie II*. Vyd. 3., doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s.: il. ISBN 80-214-2683-7.
 22. Powermat PM-IMG-220T: Invertor. In: *Maxtechnika* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.maxtechnika.cz/p/powermat-pm-img-220t-kombi-svarecka-mma-img-tig?gclid=EAIaIQobChMIIn--Yvc6W4QIVjs13Ch3c_wgSEAQYASABEgLUAvD_BwE
 23. JEFFUS, Larry. *Welding and Metal Fabrication*. Spojené státy americké: Delmar Cengage Learning, 2012, 932 s. ISBN 978-1-4180-1374-5.
 24. NADZAM, Jeff. THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY. *Gas metal arc welding: Product and procesure selection* [online]. Cleveland, OH, U.S.A.: Lincoln Global, 2014, 96 s. [cit. 2019-05-22]. C4.200. Dostupné z: https://m.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcLA-90/c4200.pdf
 25. 20 Series, Basic, Q3015, Drive Roll Kit: Podavač. In: *Miller Electric* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.millerwelds.com/accessories/wire-feeders/20-series-wire-feeders-m00300>
 26. WELD GURU. *Flux cored arc welding* [online]. 147 s. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.weldguru.com/support-files/flux-cored-arc-welding.pdf>
 27. HAVEN, Caleb. Choosing the Right Drive Roll is Key for Smooth Wire Feeding. *Fabricating and metalworking* [online]. 16. 2. 2017, 1 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://www.fabricatingandmetalworking.com/2017/02/choosing-right-drive-roll-key-smooth-wire-feeding/>
 28. Spoolmate 150 Spool Gun. In: *Miller Electric* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.millerwelds.com/accessories/guns-torches/spool-guns/spoolmate-150-spool-gun-m30069>
 29. Migomat inwertorowy 220A MIG/MAG/TIG/MMA PM-IMG-220T: Invertor. In: *Powermat* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://powermat-hurt.pl/sprzet-spawalnicy/647-migomat-inwertorowy-220a-mig-mag-tig-mma-pm-img-220t-5902565275174.html>
 30. Binzel Series Push Pull Torch 8M. In: *Proline Welding Supplies* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.weldingsupplies.co.nz/shop/Welding+Torches+%26+Consumables/Mig+Consumables/Torches/Push+Pull+Torches/Binzel+Series+Push+Pull+Torch+8M.html>
 31. BELLINI, J., S. VEZZÙE a M. SCAPPIN. Productive technologies of flux-cored wires by welding. *Wire Tech World* [online]. 2018, 26. 8. 2018, (2), 28 [cit. 2019-05-22]. ISSN 2281-311X. Dostupné z: <http://www.wiretechworld.com/productive-technologies-of-flux-cored-wires-by-welding/>
 32. Lincoln Electric K126-2 Magnum: Svařovací hořák. In: *Diamond tool* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.diamondtool.net/lincoln-electric-k126-2-magnum/product/0/le%20k126-2>
 33. KEARNS, W. H. *Welding handbook: Welding process - arc and gas welding and cutting, brazing, and soldering*. 7th ed. Miami, Florida 33125, U.S.A.: AWS, 1978. ISBN 978-1-349-04295-1.
 34. FOX, Robert. Is submerged arc welding the right process for you?. *FMA Communications* [online]. 2017, 22. 9. 2017 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z:

- <https://www.thefabricator.com/article/arcwelding/is-submerged-arc-welding-the-right-process-for-you->
35. KUBÍČEK, Jaroslav. *Renovace a povrchové úpravy v.1.3: Studijní opora* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006, 90 s. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hrp_renovace_a_povrchove_upravy_kubicek.pdf
 36. Harsh power generation environment no match for spray coating and Plasma Transferred Arc (PTA) cladding solutions from Thermaspray. *Creamer media's engineering news* [online]. 18. 1. 2016, 4 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.engineeringnews.co.za/print-version/harsh-power-generation-environment-no-match-for-spray-coating-and-plasma-transferred-arc-pta-cladding-solutions-from-thermaspray-2016-01-18>
 37. MRŇA, Libor. *Navarování laserem: Studijní opora* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 22 s. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_navarovani_laserem_mrna.pdf
 38. Laserové navařování. *MMspektrum* [online]. 2001, (4), s. 67 [cit. 2019-05-22]. DOI: 010435. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-navarovani.html>
 39. Laser Welding for pressure vessel and pipework. In: *Westermans International Ltd* [online]. 5. 2. 2013 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.westermans.com/blog/laser-welding-vessel-fabrication/>
 40. Svařování TIG, svářečky TIG (WIG), svařovací zdroje TIG, svaření TIG, TIG svářečka. In: *Schinkmann* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/tig>
 41. ANDERSON, Kenton. Stick vs. MIG vs. TIG: Which Process is Right For You?. In: *Welding supplies from iOC* [online]. 25. 2. 2015 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.weldingsuppliesfromioc.com/blog/stick-vs-mig-vs-tig-which-process-is-right-for-you/>
 42. HLAVATÝ, Ivo. *The Theory and Technology of Welding* [online]. 2013 [cit. 2019-05-22]. ISBN 978-80-248-2414-7. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/indexse.htm>
 43. FOLDYNA, V., K. HENNHOFFER, V. OLŠAROVÁ, et al. *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2. vydání. Ostrava: Zeross, 2001, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
 44. SIGMUND, Marián. *Svařovací parametry*.
 45. OK Tubrodur 60 G M. In: *Weldis* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.weldis.cz/navarove-draty-ok-tubrodur-60-g-m-D-1187.html>
 46. Megafil® A760M, pr. 1,2 mm, 16kg cívka. In: *Wirpo s.r.o.* [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.wirpo.cz/eshop/megafil-a760m-pr-1-2-mm>
 47. ČSN EN ISO 17639. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Březen. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
 48. KRATINA, Jakub. Tvrdost – převodní tabulka. In: *Ekonstrukter* [online]. 4. 4. 2013 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/tvrdost-prevodni-tabulka>
 49. DOLEŽAL, Pavel a Bohumil PACAL. Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů: Studijní opora [online]. [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/hmsm/index.htm>

50. ČSN EN ISO 15614-7. *Stanovení a klasifikace postupů svařování kovových materiálů: Zkouška postupu svařování – část 7: navařování*. Březen. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
51. CITACE PRO. Generátor citací [online]. 2013 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost materiálu	[%]
C _c	Konstanta chemického složení	[-]
C _p	Konstanta zahrnující tloušťku mat. a chem. složení	[-]
C _s	Konstanta zahrnující tloušťku materiálu	[-]
HRC	Tvrdost dle Rockwella	[-]
HV	Tvrdost dle Vickerse	[-]
I	Svařovací proud (parametr)	[A]
I _s	Proud při svařování	[A]
ΔI	Rozdíl proudů	[A]
k	Koeficient tepelné účinnosti svařovacích metod	[-]
Q	Vnesené teplo	[kJ·mm ⁻¹]
Q _{CT}	Celkové vnesené teplo od elektrody Tubrodur 60 G M	[kJ·mm ⁻¹]
Q _{CM}	Celkové vnesené teplo od elektrody Megafil A760M	[kJ·mm ⁻¹]
Q _M	Vnesené teplo od jedné housenky pro p. elektrodu Megafil A760M	[kJ·mm ⁻¹]
Q _T	Vnesené teplo od jedné housenky pro p. elektrodu Tubrodur 60 G M	[kJ·mm ⁻¹]
R _{eH}	Horní mez kluzu	[MPa]
R _m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
s	Tloušťka materiálu	[mm]
t	Čas	[s]
T _p	Teplota přehřevu	[°C]
U ₀	Napětí naprázdno	[V]
U _s	Napětí při svařování	[V]
ΔU	Rozdíl napětí	[V]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Příklady využití svařování a navařování [2], [3], [4], [6]	9
Obr. 2	Roztřískovací segmenty [9]	10
Obr. 3	Sídlo firmy PILANA a.s. [8]	10
Obr. 4	Základní rozměry rotoru roztřískovače	11
Obr. 5	Schematické zobrazení FCAW [20]	13
Obr. 6	Základní schéma svařování metodou FCAW [2]	14
Obr. 7	Svařovací invertor od firmy Powermat [22]	15
Obr. 8	Strmá voltampérová charakteristika [15]	16
Obr. 9	Plochá voltampérová charakteristika [15]	16
Obr. 10	Konstantní velikost elektrického oblouku [24]	16
Obr. 11	Čtyřkladkový mechanismus [25]	17
Obr. 12	Typy podávacích kladek [27]	18
Obr. 13	Svařovací hořák Miller [28]	18
Obr. 14	Invertor se systémem tlačení elektrody [29]	18
Obr. 15	Hořák pro Push-pull systém [30]	19
Obr. 16	Plněná elektroda	19
Obr. 17	Schematické zobrazení výroby plněných elektrod [31]	19
Obr. 18	Profily různě vyrobených elektrod [31]	20
Obr. 19	Podíl difundovaného vodíku na čase pro švové a bezešvé plněné elektrody [31]	20
Obr. 20	Svařovací hořák pro metodu FCAW [32]	21
Obr. 21	Porovnání svařování bez a s odvodem dýmu [23]	21
Obr. 22	Navařování materiálu metodou SAW [34]	22
Obr. 23	Schéma plazmového navařování [36]	22
Obr. 24	Kuželová tryska s koaxiálním přívodem [39]	23
Obr. 25	Schéma svařování pro metodu TIG [41]	23
Obr. 26	Schéma obalované elektrody [42]	24
Obr. 27	Schéma řezu svařeného materiálu	25
Obr. 28	Nařezání zkušebních vzorků	30
Obr. 29	Schématické znázornění řezu vzorku	30
Obr. 30	Lisovací přístroj ECOPRESS 100	31
Obr. 31	Broušení na brusce FERM BGM 1021	31
Obr. 32	Brusné kotouče	31
Obr. 33	Kotoučová bruska Struers	31
Obr. 34	Makrostruktura vzorku A1	32
Obr. 35	Makrostruktura vzorku B1	32
Obr. 36	Makrostruktura vzorku A2	33
Obr. 37	Makrostruktura vzorku B2	33
Obr. 38	Mikrostruktura vzorku A1	34
Obr. 39	Mikrostruktura vzorku B1	34
Obr. 40	Mikrostruktura vzorku A2	35
Obr. 41	Mikrostruktura vzorku B2	35
Obr. 42	Schéma metody měření tvrdosti dle Vickerse [49]	36
Obr. 43	Umístění vpichů pro vzorek 1	36
Obr. 44	Grafická závislost naměřené tvrdosti na vzdálenosti pro vzorek A1	37

Obr. 45	Grafická závislost naměřené tvrdosti na vzdálenosti pro vzorek B1	37
Obr. 46	Umístění vpichů pro vzorek 2	38
Obr. 47	Grafická závislost naměřené tvrdosti na vzdálenosti pro vzorek A2	39
Obr. 48	Grafická závislost naměřené tvrdosti na vzdálenosti pro vzorek B2	39
Obr. 49	Zkušební kus [50]	40
Obr. 50	Umístění vzorků pro navařování na plech [50]	41
Obr. 51	Příčná tvrdost krycí vrstvy [50]	41

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.	Mechanické vlastnosti oceli S355J2+N pro tavbu číslo 19215 [12]	12
Tab. 2	Chemická analýza oceli S355J2+N pro tavbu číslo 19215 [12]	12
Tab. 3	Použité kovové plněné elektrody [18], [19]	12
Tab. 4	Orientační hodnoty přehřevu dle obsahu uhlíku [43]	25
Tab. 5	Navařovací parametry [44]	27
Tab. 6	Koeficienty tepelné účinnosti svařovacích metod [16]	28
Tab. 7	Porovnání cen plněných elektrod [45], [46]	29
Tab. 8	Výsledné tvrdosti návaru Megafil A760M	36
Tab. 9	Výsledné tvrdosti návaru Tubrodur 60 G M	38
Tab. 10	Porovnání maximálních tvrdostí návarů s materiálovým listem [47], [18], [19]	39
Tab. 11	Kontrola a zkoušení zkušebních svarů pro tvrdonávary [50]	40
Tab. 12	Kritéria přípustnosti pro NDT [50]	41
Tab. 13	Kritéria přípustnosti pro DT [50]	42
Tab. 14	Maximální hodnoty tvrdosti pro základní materiál [50]	42

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Inspekční certifikát [12]
Příloha 2	Katalog svařovací plněné elektrody Tubrodur 60 G M [18]
Příloha 3	Katalog svařovací plněné elektrody Megafil A760M [19]
Příloha 4	Svařovací parametry [44]
Příloha 5	Specifikace svařovacího postupu (pWPS) [17]

INSPEKČNÍ CERTIFIKÁT 3.1

INSPECTION CERTIFICATE, ABNAHMEPRÜFZEUGNIS, CERTIFICAT DE RÉCEPTION

EN 10204:2004

VITKOVICE STEEL

Adresa: VITKOVICE STEEL a.s.
Město: Víteňská 200, 250 60 Víteňská, P.O. Box 200
ČESKÁ REPUBLIKA

Adresa: Česká republika, Česká republika, Česká republika, Česká republika

ARJ Číslo potvrzení: No. 2

5723/2016

173802/2016

133555/005

583898/K

136994

337247285188

Zařazení: 2016

29.02.2016

1/ 2

136994

337247285188

23 550 kg

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N

EN 10163-2 Tř. A Podsk. 1

EN 10025-2:2004

EN 10029 A/N



OK Tubrodur 60 G M

EN 14700: T Fe9
(DIN 8555: MF6-55GP)

Použití:

Kovová plněná elektroda pro navařování pod tavidlem.

Klasifikace, certifikace:

-

Typ náplně:

s kovovým práškem

Ochranný plyn:

C1 (EN ISO 14175)

Polarita:

DC+

Tvrdost:

550 - 650 HV

Typické chemické složení - čistý svařový kov (%):

C	Si	Mn	Cr	Mo
0,60	0,80	0,80	5,50	1,00

Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty:

Průměr (mm)	Proud (A)	Napětí (V)	Výkon svařování (kg/h)
1,2	150 - 350	18 - 34	2,2 - 7,0
1,6	150 - 450	21 - 40	1,8 - 9,0



Materiálový list

Megafil ® A 760 M

Strana 1/1

SKUPINA:	Navařování
METODA:	Trubičkový drát s kovovou náplní FCAW / MAG
NORMY:	EN ISO 14700 : T Fe 2
JINÉ:	DIN 8555 : MSG 1-GF-60-P
VÝROBCE:	Drahtzug Stein
MATERIÁLY:	Houževnatý návarový kov vysoce odolný trhlínám odolný otěru při současném zatížení těžkými rázy a šoky. Interpass teplota nesmí překročit teplotu 250°C. Návar lze strojně obrábět pouze nástroji se speciálními řeznými destičkami nebo broušením, lze jej dále tepelně zpracovávat. Nepoužívat pro dostavbu materiálu pouze jako vrstvy odolné opotřebení, pro dostavbu chybějícího materiálu použít Megafil 731 B. Dosahovaná tvrdost je závislá na základním materiálu, je dosahována v první vrstvě.
POUŽITÍ:	Středně legovaný trubičkový drát s kovovou náplní pro navařování metodou MAG, netvoří strusku. Rypadla, dobývací korečky a lžice, zuby nakladačů, dopravníky, otěru vzdorné plochy, kuželové a čelistové drtiče.

CHEMICKÉ SLOŽENÍ

C	Mn	Si	Cr	Mo	Fe
0,5	1,5	0,6	6	0,5	rest

TVRDOST:	57-63 [HRC]
POLARITA:	DC+
PLYN:	M21
POLOHY:	

PRŮMĚRY A BALENÍ

Objednací číslo	Průměr	Balení
MFA760M12	1,2 mm	16 kg / K300
MFA760M16	1,6 mm	16 kg / K300
MFAD760M12	1,2 mm	300 kg / POP 570

2 vrstvý návar / 3+2 housenky

1 – Tubrodurem 60G-M, pr. 1,2 mm

U=27,3V

I=190A


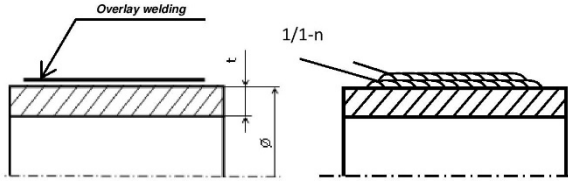
v=67mm/min.

2- MF760M, pr. 1,2 mm

U=25,9V

I=190A

v=60mm/min.

	Welding Procedure Specification acc. to EN ISO 15 609 -1		pWPS					
	Hardfacing Overlay		138-1.2-TFe					
Specifikace svařovacího postupu dle EN ISO 15 609-1		Návar Tvrdokovem						
Welding Process/Metoda: 1. 138 - manual / ruční Type of Weld/Typ svaru: hard facing overlay weld /návar tvrdokovem Backing/Podložka: n.a.								
Supporting/Související WPQR: Application/Aplikace: Manufacturer/Výrobce: Pilana Machinery s.r.o.								
Base metal / Základní materiál (acc. to/ dle EN ISO 15 608): Material 1: S355J2+N Group/Sk.: 1.2 Outside Dia./Vnější ϕ : - mm Thickness/Trouška: 10-40 mm								
Remark/Poznámka:								
Filler Material / Svařovací materiál: Classification: 1. EN ISO 14700: T Fe2 Klasifikace: Designation: 1. Megafil A 760 M Označení: Náhrada / Replace: 1. Filler metal product form / Forma svařovacího mat.: 1. Metal Flux Cored Wire / Plněná elektroda s kovovým práškem Drying of F.M./Sušení svař. mat.: 1. none Remark/Poznámka:		Joint Design / Tvar spoje: 						
Gas / Plyn: Shielding/Ochranný: 1. 82/18 8-16 Backing/O. kořene: 1. none Trailing/Dodatečná: 1. none Remark/Poznámka: Ar/CO2 - M21 acc. to EN ISO 14175								
Position / Pozice: PA	Finished overlay thickness / Opracovaná trouška návaru: n.a mm Overlay finish / Opracování návaru: bez / without Qualified overlay thickness / Kvalifikovaná trouška návaru: n.a mm							
Preheat / Předehřev: Preheat Temp./Teplota předehřevu: min. 150 °C Device/Zařízení*								
Interpass: max. 350 °C Remark / Poznámka:		Soaking/Dohřev: - °C - h Cooling After W./Ochlazení po svař.: air/na vzduchu Temp. Control/Kontrola teploty: Thermochalk, contact thermometer/termokřída, dotyk. teploměr *preheating by flame or electric device / předehřev plamenem nebo el. zařízením						
Post Weld Heat Treatment / Tepelné zpracování po svařování:								
Type/Typ: n.a		Temperature/Teplota: °C Holding Time/ Čas výdrže: min Heating Rate / Rychl. ohřevu: °C/h Cooling Rate / Rychl. ochlaz.: °C/h						
Post-heating for hydrogen release / Dohřev pro snížení obsahu dif.vodíku:								
none		Temperature/Teplota: °C Time / Čas: min						
Technique / Technika svařování:								
Tungsten El./Wolframová elektroda: ϕ n.a mm Type: Type of Bead/Tvar housenky: string Oscillation/Oscilace: 1. none Surface Preparation/Příprava povrchu: 1. machining/obrábění Method of Cleaning/Metoda čištění: 1. mech.brushing, grinding/ mech.kartáčování, broušení Single or multiple layer / jednovrstvý nebo vícevrstvý: 1. multiple / vícevrstvý Pulsing/Pulzace: 1. n.a. Wire sytem/drátový systém: 1. single wire / jednodrátový Number of wires/počet drátů: 1. n.a. Torch orifice diameter / Průměr otvoru hořáku: 1. ϕ 20,0 mm Remark/Poznámka:								
Welding Parameters / Svařovací parametry:								
Layer(s) / pass Vrstva / housenka	Process Metoda	Filler Material/ Svařovací materiál ϕ (mm) Classification/Klasifikace	Type/Polarity Typ /Polarita	Amperage/ Proud (A)	Voltage/ Napětí (V)	Filler metal feed rate/ Podávání drátu(cm/min)	Travel speed/ Pos.rychlost (cm/min)	Heat input/ Vnesené teplo(KJ/mm)
1 / 1 - n	138	1,2 T Fe2	DC/+	180-220	24-28	/	6,0-7,0	
Remarks / Poznámky: Cleaning - mechanical brushing/grinding after welding of each pass. / Čištění mechanickým kartáčováním/broušením po svaření každé housenky. Repair welding has to be done according to this WPS. / Opravy svařování musí být provedeny dle této WPS.								
pWPS 138-1.2-TFe Prepared by/Připravil: Sigmund Approved by/Schválil: Sigmund Date/Datum: 7.4.2019 Revision/Revize: 0 Page/Strana: 1/1								